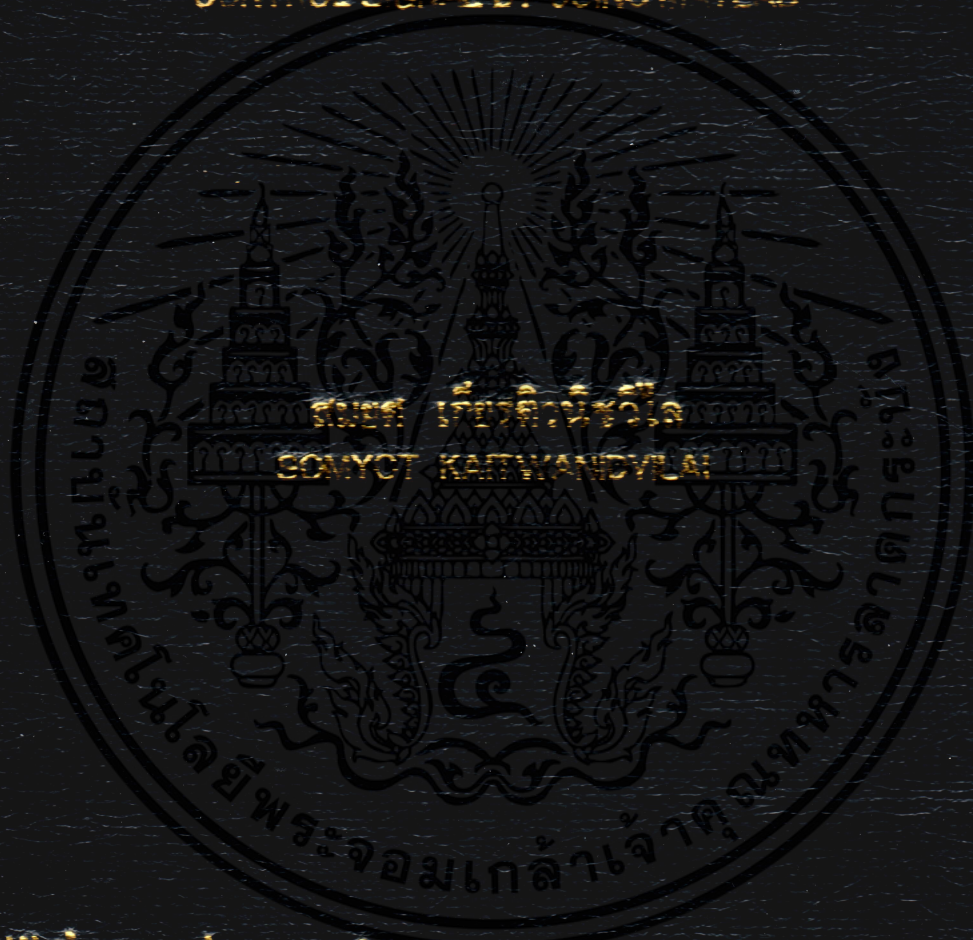


การวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส  
โดยใช้โปรแกรม MATLAB

THE ANALYSIS AND DESIGN FOR THREE PHASE PWM INVERTER  
CONTROL SIGNAL BY USING MATLAB



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-772-5

การวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมที่ดับลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส  
โดยใช้โปรแกรม MATLAB

THE ANALYSIS AND DESIGN FOR THREE PHASE PWM INVERTER  
CONTROL SIGNAL BY USING MATLAB



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน, เดือน, ปี 3 ก.ค. 2543

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-772-6

**THE ANALYSIS AND DESIGN FOR THREE PHASE PWM INVERTER  
CONTROL SIGNAL BY USING MATLAB**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 2000 ภาษาอังกฤษเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ISBN 974-622-772-6**



**COPYRIGHT 2000**  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB  
นักศึกษา นายสมยศ เกียรติวนิชวิไล  
รหัสประจำตัว 41061012  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
พ.ศ. 2543  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ร.อ. ผศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมแบบพัลส์วิดท์มอดูเลตของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยแสดงผลการจำลองการทำงานในรูปของคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณ, รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต, ผลของช่วงเดดไทม์ที่ทำให้เกิดแรงดันผิดพลาด(Error Voltage) ขึ้นในวงจร และโดยอาศัยการวิเคราะห์ในเชิงเมตริกของโปรแกรมทำการสร้างและเก็บสัญญาณแพทเทิร์นในรูปภาษาแอสซิมบลีซึ่งสามารถอัดลงอีพรอมเพื่อใช้ในวงจรควบคุมได้ ทำให้การพัฒนาารูปคลื่นสัญญาณทำได้ง่ายขึ้นค่าต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบสามารถป้อนเข้าสู่โปรแกรมได้โดยง่าย อีกทั้งยังสามารถออกแบบสร้างสัญญาณแพทเทิร์นใหม่ที่มีการชดเชยผลจากเดดไทม์ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนารูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ผลเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองถูกนำมาแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำผลของการออกแบบสัญญาณควบคุมไปทดลองบนวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยทดลองกับรูปคลื่นสัญญาณชานูโซดอล พีดับบลิวเอ็ม (Sinusoidal PWM), สเปซเวกเตอร์ พีดับบลิวเอ็ม(Space Vector PWM), ฮาร์โมนิกส์ อินเจกชัน พีดับบลิวเอ็ม (Harmonic Injection PWM), พีดับบลิวเอ็มแบบไม่ต่อเนื่อง 120 องศา (Discontinuous PWM 120°) และ เจนเนอไรซ์ ดิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็มบางรูปคลื่น (Generalized Discontinuous PWM ) เพื่อหาความเหมาะสมในการเลือกใช้รูปคลื่นแต่ละแบบที่จุดทำงานต่างๆกัน(มอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆกัน)และยังได้แสดงถึงข้อดีของการใช้รูปคลื่นที่ปรับปรุงโดยการชดเชยผลของเดดไทม์ด้วย จากผลการจำลองและการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียในการใช้งานการสวิตซ์แต่ละแบบในย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆกัน ซึ่งจะเป็แนวทางในการเลือกรูปแบบสัญญาณแพทเทิร์นให้เหมาะสมกับย่านทำงาน

สำหรับการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่มีประสิทธิภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	The Analysis and Design for Three Phase PWM Inverter Control Signal by using MATLAB
<b>Student</b>	Mr. Somyot Kaitwanidvilai
<b>Student ID.</b>	41061012
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Capt. Asst. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

## ABSTRACT

This thesis presents the analysis and design for three phase PWM inverters control signals by using MATLAB program. The waveform quality, current and voltage waveforms, current and voltage spectra and error voltage of deadtime effect are evaluated and simulated by the program. By using the matrix analysis technique in this developed program, various switching patterns are able to be converted to the assembly file that make easily to store the pattern to EPROM which is used for control circuit. This program can also improve and design the deadtime compensated waveform. The necessary input parameters for control signals can be easily put into the program that make many advantages for switching pattern development. The output simulation results are arranged in visual and clearly shown. In this thesis, the various switching patterns designed by the program Sinusoid PWM, Space Vector PWM, Harmonic Injection PWM, Discontinuous PWM 120°, Generalized Discontinuous PWM are provided and implemented on three phase inverter circuit to confirm the results and define the criteria for the selection of optimize patterns for each modulation index range. Deadtime compensated waveforms also show the advantage of this research. As the simulated and experimented results, the advantages and disadvantage of various switching patterns in various modulation index ranges are shown and guided for the selection of optimize patterns for higher performance three phase inverter design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณและการใช้โปรแกรม MATLAB จาก ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อประเสริฐและคุณแม่ลำควน เกียรติวนิชวิไล ที่ให้กำลังใจและเป็นที่ยกคำปรึกษาในการศึกษาและการดำเนินชีวิตเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ นางสาวจิตติมา ศรีสกุล นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเป็นกำลังใจและเรียบเรียงจัดพิมพ์

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายประจำเดือนตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ(The Research Center for Communications and Information Technology, ReCCIT) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการซื้ออุปกรณ์วิจัยและค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้  
สุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์นี้

คุณค่า, ประโยชน์และกุศลอันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายสมยศ เกียรติวนิชวิไล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์และสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็ม.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ.....	4
2.2.1 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบชายนุ่นุชอย.....	5
2.2.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเดิร์ดฮาร์โมนิกส์อินเจ็คชั่น.....	7
2.2.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์.....	8
2.2.4 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบดิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม.....	9
2.2.4.1 เทคนิคดิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 120 องศา.....	10
2.2.4.2 เทคนิคแบบเจนเนอโรเซชั่น ดิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม.....	10
2.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและคุณสมบัติของรูปคลื่นสัญญาณ.....	11
2.4 ทฤษฎีการทำนายกระแสจากรูปคลื่นแรงดัน (Prediction Method).....	13
2.5 ผลของเดค้ไทม์ในวงจรรินเวอร์เตอร์.....	15
2.6 เทคนิคการชดเชยผลของเดค้ไทม์ในวงจรรินเวอร์เตอร์.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

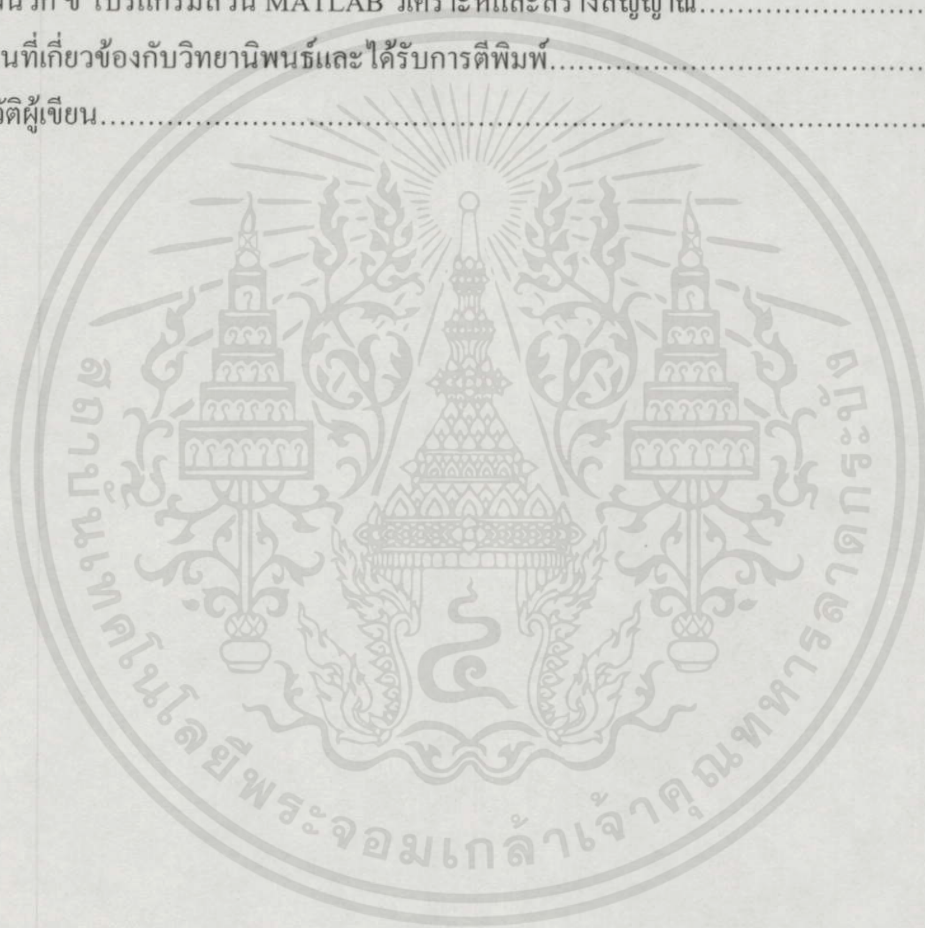
	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณ โดยโปรแกรม MATLAB.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	19
3.2.1 ส่วนอินพุท.....	21
3.2.2 ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมพีคดับลิวเอ็ม.....	22
3.2.2.1 บล็อกสร้างสัญญาณควบคุมพีคดับลิวเอ็ม 1 เฟส .....	22
3.2.2.2 บล็อกสร้างสัญญาณควบคุมพีคดับลิวเอ็ม.....	22
3.2.3 ส่วนวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณและแสดงผล.....	23
3.3 การสร้างไฟล์แอสเซมบลีด้วยโปรแกรม MATLAB.....	25
บทที่ 4 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรถูกำลัง.....	26
4.1 บทนำ.....	26
4.2 บล็อกไดอะแกรมและการทำงานของวงจรถวลคุม.....	26
4.3 หลักการทำงานของวงจรถวลคุม.....	28
4.4 วงจรขั้วเกิด.....	28
4.5 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมชดเชยผลของเคดีไทม์.....	31
4.6 วงจรถูกำลัง.....	31
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
5.1 บทนำ.....	35
5.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมและผลการทดลอง.....	36
5.2.1 รูปคลื่นและสเปคตร้าของแรงดันและกระแสของวงจรถวลคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส....	36
5.2.2 ตารางแสดงค่าดัชนีคุณภาพของรูปคลื่นสัญญาณ.....	50
5.2.3 ผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจากผลของเคดีไทม์และวงจรถวลคุม.....	98

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
--	-----

6.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	107
------------------------------	-----

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.2 สรุปผลการทดลอง.....	109
6.3 ข้อควรปรับปรุงและข้อเสนอแนะ.....	110
เอกสารอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก ก บล็อกไดอะแกรม โปรแกรมส่วนSIMULINK.....	112
ภาคผนวก ข โปรแกรมส่วน MATLAB วิเคราะห์และสร้างสัญญาณ.....	116
ผลงานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	161



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	นิยามของค่าดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพรูปคลื่นเอาท์พุท.....12
3.1	พารามิเตอร์อินพุททั้งหมดที่จำเป็นในการวิเคราะห์ของโปรแกรม.....21
3.2	แสดงเอาท์พุททั้งหมดที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์.....24
5.1	แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดการะที่ต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์.....35
5.2	สรุปรูปผลการทดลองและการจำลองการทำงานในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....36
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะเป็น R-L.....50
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการะเป็น R-L.....51
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น L-L.....58
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการะเป็น L-L.....59
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น R.....66
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 2%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการะเป็น R.....67
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น R-L.....74
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการะเป็น R-L.....75
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น L-L.....82
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการะเป็น L-L.....83
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น R.....90

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เดค้ใหม่ประมาณ 4%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดภาระเป็น R.....	91
5.15 เปรียบเทียบค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้า ระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่กับวงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่ ที่ความถี่การสวิตช์ เป็น 4.05 kHz, แรงดันดีซีลิงค์ = 310 Vdc, เดค้ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ แบบมีโหลดภาระ p.f. = 0.73.....	102
5.16 เปรียบเทียบค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้า ระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่กับวงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่ ที่ความถี่การสวิตช์ เป็น 4.05 kHz, แรงดันดีซีลิงค์ = 310 Vdc, เดค้ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ แบบมีโหลดภาระ p.f. = 0.73.....	103
5.17 ค่าขนาดแรงดันอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกส์ลำดับค่าของรูปคลื่นสัญญาณเปรียบเทียบ ระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่กับ วงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 5.42.....	104
5.18 ค่าขนาดแรงดันอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกส์ลำดับค่าของรูปคลื่นสัญญาณเปรียบเทียบ ระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่กับ วงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 5.43.....	105
6.1 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ เดค้ใหม่ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อ โหลดแบบเดค้ต่ำ ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็น โหลด R-L ผลการทดลองวงจร ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่.....	108
6.2 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูง เดค้ใหม่ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อ โหลดแบบเดค้ต่ำ ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็น โหลด R-L ผลการทดลองวงจร ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่.....	108
6.3 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ เดค้ใหม่ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อ โหลดแบบเดค้ต่ำ ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็น โหลด R-L ผลการทดลองวงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.4 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูง เดค้ไทม์ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อ โหลดแบบเคลต้า ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็น โหลด R-L ผลการทดลองวงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ไทม์.....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบชานนี้้นูชอยน์พีดับบลิวเอ็ม ที่ค่ามอดูละชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz .....6	
2.2 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบเคิร์คฮาร์โมนิกส์ อินเจ็คชัน ที่ค่ามอดูละชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz .....8	
2.2 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์ พีดับบลิวเอ็ม ที่ค่ามอดูละชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz.....9	
2.3 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบคิสคอนตินิวอัสพีดับบลิวเอ็ม 120 องศา ที่ค่ามอดูละชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz.....10	
2.5 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบเจนเนอโรเซชัน คิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 30 องศา ที่ค่ามอดูละชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.80, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz .....11	
2.6 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์และสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการทํานายกระแส.....14	
2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์ใน 1 สาขาทั่วไป.....16	
2.8 ลักษณะของแรงดันผิดพลาดที่เกิดขึ้น ตามทิศทางการไหลของกระแสในสาขา.....16	
2.9 สัญญาณควบคุมที่มีการชดเชยผลของเดดไทม์ (a) $T_p > 2T_d$ (b) $T_p < 2T_d$ .....18	
3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมออกแบบ และสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็ม.....20	
3.2 ส่วนป้อนอินพุทของโปรแกรมจากส่วน SIMULINK.....21	
3.3 ส่วนป้อนอินพุทของโปรแกรมจากส่วน MATLAB.....21	
3.4 ส่วนสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบ HIPWM .....22	
3.5 ส่วนสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟส.....23	
3.6 ส่วนเลื่อนสัญญาณอ้างอิง 3 เฟส.....23	
3.7 ตัวอย่างเอาต์พุทที่ได้จากโปรแกรม .....24	
3.8 ส่วนของโปรแกรมที่แปลงสัญญาณควบคุมเป็น ไฟล์แอสเซมบลี.....25	
4.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์ (ไม่มีวงจรชดเชยผลเดดไทม์).....26	
4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการชดเชยผลของเดดไทม์.....27	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงวงจรสร้างสัญญาณควมคุม.....	29
4.4 วงจรสร้างเคค้ใหม่.....	30
4.5 แสดงวงจรจับเกต.....	30
4.6 สัญญาณป้อนกลับทิศทางกระแส.....	31
4.7 วงจรชดเชยผลของเคค้ใหม่.....	32
4.8 ไดอะแกรมวงจรกำลัง.....	33
4.9 วงจรกำลัง.....	33
4.10 วงจรควมคุม.....	34
4.11 R-L โหลดที่ต่อเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์.....	34
5.1 แสดงผลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุท p.f. = 0.73 ที่ $m_a = 0.92$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 0.80$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น.....	38
5.2 แสดงผลของรูปสเปคตราของแรงดันเอาต์พุทที่ p.f. = 0.73 ที่ $m_a = 0.92$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 0.80$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น.....	40
5.3 แสดงผลของรูปสเปคตราของกระแสเอาต์พุท ที่ p.f. = 0.73 ที่ $m_a = 0.92$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 0.80$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น .....	41
5.4 แสดงผลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุท p.f. = 0.70 ที่ $m_a = 1.15$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 1.0$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น .....	44
5.5 แสดงผลของรูปสเปคตราของแรงดันเอาต์พุทที่ p.f. = 0.70 ที่ $m_a = 1.15$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 1.0$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น .....	46
5.6 แสดงผลของรูปสเปคตราของกระแสเอาต์พุท ที่ p.f. = 0.70 ที่ $m_a = 1.15$ สำหรับรูป คลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ $m_a = 1.0$ สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น .....	48
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอลที่ได้ จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 .....	52
5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอลที่ได้ จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.4 .....	53
5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซนต์ THD ที่ได้จากเทคนิค การสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 .....	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิค เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 .....	55
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 .....	56
5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิ คการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 .....	57
5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอลที่ได้จาก เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 .....	60
5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอลที่ได้ จากเทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.6.....	61
5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $THD_2$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 .....	62
5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 .....	63
5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 .....	64
5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.6 .....	65
5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอลที่ได้จาก เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 .....	68
5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอล ที่ได้ จากเทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.8 .....	69
5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $THD_2$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 .....	70
5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลเลขชี้อนเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิค การสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 .....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 .....	72
5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับเปอร์เซนต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.8 .....	73
5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอล ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 .....	76
5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอล ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.10 .....	77
5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $THD_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 .....	78
5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 .....	79
5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 .....	80
5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับเปอร์เซนต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.10 .....	81
5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอล ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11 .....	84
5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอล ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.12 .....	85
5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $THD_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11.....	86
5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11.....	87
5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11 .....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.12 .....	89
5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 .....	92
5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพินดาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.14 .....	93
5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 .....	94
5.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $DF_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 .....	95
5.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ $DF_2$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 .....	96
5.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูลแชนอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ $THD_1$ ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.14 .....	97
5.43 สเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ( $2^{nd}$ ถึง $60^{th}$ ) ที่จุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.1 โหลด 3 เฟสสมมูลย์ต่อแบบเคลด้า p.f. = 0.73, $m_a=0.69$ สำหรับ SPWM และ GDPWM และเท่ากับ 0.6 สำหรับการสวิตช์แบบอื่น .....	98
5.44 สเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ( $2^{nd}$ ถึง $60^{th}$ ) ที่จุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.1 โหลด 3 เฟสสมมูลย์ต่อแบบเคลด้า p.f. = 0.73, $m_a=0.92$ สำหรับ SPWM และ GDPWM และเท่ากับ 0.8 สำหรับการสวิตช์แบบอื่น .....	100
5.44 ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ $2^{nd}$ ถึง $15^{th}$ ของเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ .....	106
ก.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม SPWM.....	111
ก.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม SVPWM.....	111
ก.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม DPWM120.....	112
ก.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม GDPWM.....	112
ก.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณ.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรมอเตอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด อาทิเช่น ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เอซี, แหล่งจ่ายไฟสำรอง (Uninterrupted Power Supply), อุปกรณ์แปลงไฟดีซีเป็นเอซีในระบบแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานแสงอาทิตย์(Solar Cell) ฯลฯ การพัฒนางจรมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงและคุณสมบัติที่ดีนั้น วิธีการสำคัญวิธีการหนึ่งคือ การพัฒนารูปแบบสัญญาณแพทเทิร์นการสวิตช์ (Switching Pattern) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ และได้มีผู้วิจัยกันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น เทคนิคการสวิตช์แบบซายนูโซidal พีดับบลิวเอ็ม (Sinusoid PWM : SPWM), สเตชันเวกเตอร์ พีดับบลิวเอ็ม(Space Vector PWM : SVPWM), ฮาร์โมนิกส์ อินเจกชัน พีดับบลิวเอ็ม (Harmonic Injection PWM : HIPWM), พีดับบลิวเอ็มแบบไม่ต่อเนื่อง 60 องศา (Discontinuous PWM 60° : DPWM 60°), พีดับบลิวเอ็มแบบไม่ต่อเนื่อง 120 องศา (Discontinuous PWM 120° : DPWM 120°) [1] และ เจนเนอไรด์ ดิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม (Generalized Discontinuous PWM : GDPWM ) [2] เป็นต้น หลักการสวิตช์แต่ละแบบจะมีข้อดี-ข้อเสียและคุณสมบัติแตกต่างกันไปและจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนจุดทำงาน (เปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์) ในด้านการใช้งานจะไม่มีรูปคลื่นสัญญาณแพทเทิร์นแบบใดที่จะเหมาะสมที่สุดในทุกย่านการใช้งานและค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะของรูปแบบการสวิตช์ซึ่งแต่ละแบบที่จุดทำงานต่าง ๆ กันจะสามารถทำให้ผู้ออกแบบหารูปคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งานได้

นอกจากนี้ ในการควบคุมวงจรมอเตอร์จะต้องมีช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กำหนดขึ้นเพื่อความปลอดภัย ไม่ให้อุปกรณ์สวิตช์สองชุดในสาขาเดียวกันทำงานพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการวงจรลัดขึ้นได้ แต่ช่วงเวลาดังกล่าวจะก่อให้เกิดความผิดพลาดและแรงดันไฟฟ้าผิดพลาด(Error Voltage)ที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำขึ้น [3] ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องคุณภาพของรูปคลื่นสัญญาณขึ้น ในการแก้ไขผลจากเดดไทม์นั้นจะต้องอาศัยหลักการออกแบบโดยการชดเชยผลของเดดไทม์จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีส่วนที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดของรูปคลื่นสำหรับวงจรมอเตอร์ที่เก็บรูปแบบแพทเทิร์นแบบดิจิตอล คือ ความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณแพทเทิร์นที่เก็บในรูปแบบข้อมูลดิจิตอลที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีกด้วย จากลักษณะของการควบคุมวงจรมอเตอร์โดยอาศัยเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้การออกแบบและการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆทั้งหมดทำได้ยาก อีกทั้งแพทเทิร์นรูปแบบใหม่ ๆ มีลักษณะเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้สัญญาณแพทเทิร์นแบบต่างๆที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยอาศัยการประยุกต์ใช้

โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของรูปคลื่น รวมไปถึงผลที่เกิดจากช่วงเวลา เด็ด ไทม์และผลจากความไม่ต่อเนื่องในการเก็บรูปแพทเทรินด้วย โดยแสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียและคุณสมบัติของการควบคุมด้วยรูปคลื่นแพทเทรินแต่ละแบบในแต่ละมอดูเลชันอินเด็กซ์ ซึ่งจะเป็นผลดีในการเลือกใช้ให้ถูกต้องกับการออกแบบ จากผลการวิเคราะห์จะสามารถสร้างแพทเทรินสัญญาณโดยตรงโดยอาศัยการวิเคราะห์ในเชิงเมตริกทำการแปลงสัญญาณแพทเทรินที่ได้ให้อยู่ในรูปภาษาแอสเซมบลีและเก็บไว้ในอีพรอม(EPROM) จากนั้นอ่านข้อมูลออกผ่านไปยังวงจรเชื่อมต่อและวงจรขับเกจไปยังขาเกจของอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่ง ของวงจรอินเวอร์เตอร์ และในตอนท้ายจะใช้โปรแกรมช่วยออกแบบนี้สร้างแพทเทรินสัญญาณใหม่ที่ปรับปรุงโดยมีทฤษฎีผลเนื่องจากเค็ด ไทม์เข้าไปในรูปคลื่นสัญญาณ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าขาออกได้

การเลือกใช้แพทเทรินที่เหมาะสมกับจุดทำงาน จะทำให้เกิดผลดีอย่างยิ่งในการออกแบบทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพ, คุณสมบัติ รวมไปถึงการประหยัดพลังงานและความสูญเสียในวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในการวิเคราะห์และออกแบบโดยโปรแกรมที่น่าเสนอนี้ จะได้นำผลจากการจำลองไปใช้งานจริงเพื่อสร้างแพทเทรินที่เหมาะสมกับช่วงการทำงานต่างๆด้วย ข้อมูลที่ได้จะทำให้การออกแบบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทำได้ง่ายขึ้น อีกทั้งการวิเคราะห์โดยรวมผลของเค็ด ไทม์และความไม่ต่อเนื่องในการเก็บรูปคลื่นในวงจรดิจิทัล จะทำให้การวิเคราะห์ผลใกล้เคียงกับความจริงมากยิ่งขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณแพทเทรินโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยจัดรูปแบบโปรแกรมให้สามารถปรับค่าข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์และออกแบบได้ง่าย (ค่า Modulation Index, ค่า ความถี่ของสัญญาณ Carrier, ค่าช่วงเวลาเค็ด ไทม์ที่ต้องการ ฯลฯ) โดยสามารถนำผลการจำลองการทำงานมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติและข้อดีข้อเสียของรูปคลื่นการสวิทซ์แต่ละแบบได้ ในการวิเคราะห์จากโปรแกรมนี้จะรวมผลของเค็ด ไทม์และความไม่ต่อเนื่องของการเก็บรูปคลื่นในการวิเคราะห์ เพื่อให้การวิเคราะห์ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถใช้เพียงโปรแกรมเดียวในการสร้างสัญญาณแพทเทริน, วิเคราะห์สัญญาณ, แปลงรูปแบบสัญญาณเป็นข้อมูลเก็บในหน่วยความจำของวงจรควบคุม, รวมไปถึงการสร้างไฟล์ที่จะเก็บแพทเทรินสัญญาณในอีพรอม จึงถือเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบ (Computer Aid Design) วงจรอินเวอร์เตอร์ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จะได้สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ของวงจรกับผลการทดลองจริง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จึงทำให้การวิเคราะห์ผลจากการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทำได้ง่าย, สะดวกและน่าใช้มากขึ้นและสามารถนำข้อมูลจากผลการจำลองการทำงาน ไปออก

แบบแพทเทิร์นเก็บไว้ในอีพროมเพื่อทดลองจริงได้ ทำให้การพัฒนาการวางจอร์อินเวอร์เตอร์ทำได้โดยง่าย โดยจากผลการวิเคราะห์และทดลองจะสามารถแสดงและเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียและคุณสมบัติของการสวิตซ์แต่ละแบบได้

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการแสดงผลการทำงานและออกแบบสัญญาณควบคุมพีคดับลิวเอ็มแบบต่างๆในวงจอร์อินเวอร์เตอร์ การเขียนโปรแกรมจะอาศัยหลักการที่สำคัญเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลและการออกแบบสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งได้แก่ หลักการควบคุมสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม แบบต่างๆ, การวิเคราะห์คุณภาพรูปคลื่น, ผลจากช่วงเวลาเค็ดไทม์และการชดเชยผลคังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ยังใช้ผลจากโปรแกรมไปทดลองจริงในวงจอร์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสขนาด 2 kVA ที่มีมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งจากความสะดวกในการใช้งานและการทดลองทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้โดยง่าย และสามารถวิเคราะห์คุณลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณได้รวดเร็วขึ้น การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแต่ละรูปคลื่นที่จุดทำงานต่างๆกันจึงทำได้ง่ายขึ้น โปรแกรมและวงจอร์ทดลองในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคนิคการควบคุมวงจอร์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบพีคดับลิวเอ็มได้

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบโปรแกรมที่เขียนจากโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมพีคดับลิวเอ็มเพื่อใช้ในการควบคุมวงจอร์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณควบคุมแบบ SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM  $120^{\circ}$ , GDPWM โดยแสดงผลที่รวมผลของเค็ดไทม์ที่ไม่ต่อวงจอร์ชดเชยผลและที่มีการใช้วงจอร์ชดเชยด้วย ในการแสดงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลและออกแบบของโปรแกรมจะทดลองจริงกับวงจอร์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์และสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

## 2.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์และสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มโดยใช้โปรแกรม MATLAB นี้จะอาศัยทฤษฎีและหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและคุณสมบัติของรูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม, สเปกตรัมของสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุต, เทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ และผลของเดดไทม์และเทคนิคการชดเชยผลของเดดไทม์ มาใช้ในการเขียนโปรแกรม และจัดรูปโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ยังอาศัยวิธีการทำนายรูปคลื่นกระแสจากรูปคลื่นแรงดัน (Prediction Method) มาใช้ในการวิเคราะห์และทำนายรูปคลื่นกระแส ทำให้การจำลองผลการทำงานของโปรแกรมสมบูรณ์มากขึ้น

## 2.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ

รูปคลื่นสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในการใช้งานเนื่องจากมีข้อดีมากกว่าการสวิตช์รูปคลื่นแบบเดิม (แบบ ซิกซ์สเตป(Six Step))อยู่หลายประการ อย่างไรก็ตามสามารถสรุปข้อดี-ข้อเสียในการสวิตช์แบบซายน์พีดับบลิวเอ็มเมื่อเปรียบเทียบกับแบบซิกซ์สเตปได้ดังนี้

ข้อดีของสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1. สเปกตรัมของฮาร์โมนิกอยู่ห่างจากพินดามเมนทอลมากกว่า เป็นการลดองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำที่ไม่เป็นที่ต้องการในด้านคุณภาพรูปคลื่น

2. สามารถปรับระดับของแรงดันและกระแสได้อย่างเป็นเชิงเส้น ตามค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ ข้อเสียของการสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1. สดทอนองค์ประกอบพินดามเมนทอล(องค์ประกอบที่ต้องการใช้) ลงไปจากเดิม

2. ความถี่การสวิตช์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งหมายถึงจะต้องเลือกอุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงและจะทำให้พิคคของอุปกรณ์นั้นๆลดลงและเกิดความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์เพิ่มมากขึ้น

3. ให้กำเนิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ลำดับสูง (ความถี่สูง) มากกว่าแบบเดิม [4]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อดีของการสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มมีประโยชน์ต่อการพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์อย่างมาก รวมถึงในปัจจุบันอุปกรณ์กำลังสวิตช์แบบเกตเทริน-ออฟ (Gate-turn-off power device) ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดังนั้น การสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มจึงเป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ทั้งหลายจึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเพื่อลดข้อเสียของการสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มที่กล่าวมาข้างต้นนี้

ให้น้อยที่สุด แนวทางหนึ่งในการพัฒนาที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแรงดันอ้างอิงซึ่งมีอยู่หลายแบบเพื่อให้คุณสมบัติของสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มดีขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มที่สำคัญ 5 เทคนิคดังต่อไปนี้

### 2.2.1 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบชายน้ชูชอย (Sinusoidal Pulse Width Modulate, SPWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการโดยนำรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงแบบชายน้ชูชอยที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานที่ต้องการมาเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์(สามเหลี่ยม)ที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ที่ออกแบบไว้ ค่าแอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์จะหมายถึง ค่าอัตราส่วนของขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นชายน้ชูชอยเทียบกับขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นแคเรียร์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงได้ดังนี้

$$v_{control,a} = m_a \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \omega t \leq 2\pi \quad (2.1)$$

โดยที่

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}}$$

เมื่อ

$$\hat{V}_{control}$$

คือ ค่าขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง และ

$$\hat{V}_{tri}$$

คือ ค่าขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณแคเรียร์

สำหรับการสร้างสัญญาณควบคุมในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส นั้น จะใช้สัญญาณแคเรียร์เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง 3 สัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณจะต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุม 6 สัญญาณที่ใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ ค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณแคเรียร์กับ สัญญาณอ้างอิง จะนิยามไว้โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า  $m_f$  โดยนิยามว่า

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{control}} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$f_{control}$  คือ ค่าความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง และ

$f_{tri}$  คือ ค่าความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณแคเรียร์

ในการออกแบบโดยเลือกค่า  $m_f$  ที่เหมาะสมนั้น ได้มีผู้แสดงไว้ใน [5] ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ในกรณีที่ออกแบบค่า  $m_f$  ( $m_f \leq 21$ ) ค่าๆ จะต้องเลือกค่า  $m_f$  เป็นเลขคี่เพื่อไม่ให้เกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่ขึ้น

2. กรณีค่า  $m_f$  ( $m_f > 21$ ) สูง ผลของการเลือกใช้ซิงโครนัสพีดับบลิวเอ็มจะมีน้อย จึงไม่จำกัดค่าทั้งสิ้น อีกทั้งยังช่วยให้ลดแรงบิดทางกลและต้องอ้างถึงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาสัญญาณเอาต์พุตแรงดันที่เกิดจากรูปคลื่นนี้สามารถพิจารณาได้ 2 ย่าน คือ

ย่านลิเนียร์มอดูเลชัน ( $m_a \leq 1$ ) เป็นย่านที่แรงดันเอาต์พุตแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าแอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์โดยค่าแรงดันไลน์-ทู-ไลน์เอาต์พุตมีค่าประมาณดังสมการต่อไปนี้[5]

$$V_{LL,rms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \quad (2.3)$$

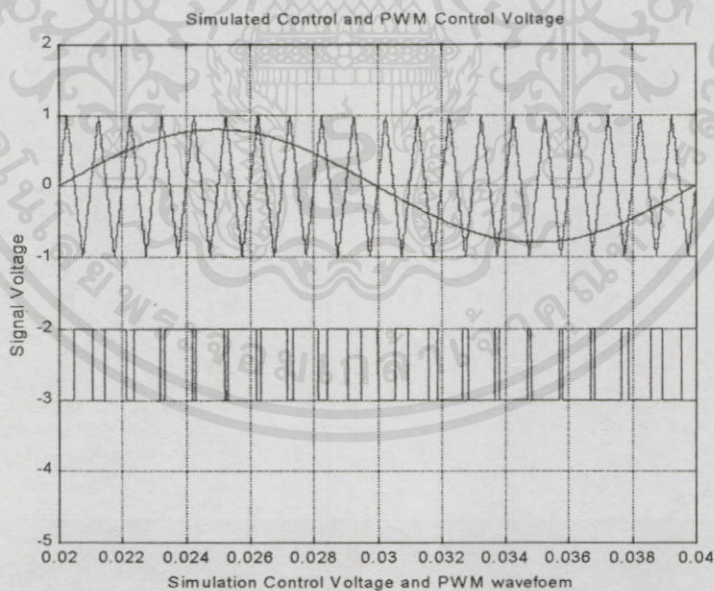
เมื่อ ค่า  $V_d$  เป็นค่าระดับแรงดันคิซีลิงค์

จากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนได้เป็นค่าประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{LL,rms} \approx 0.612 m_a V_d \quad (2.4)$$

ย่านโอเวอร์มอดูเลชัน ( $m_a > 1$ ) เป็นย่านที่แรงดันเอาต์พุตไม่แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าแอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์ ซึ่งโดยมากมักไม่มีการนำย่านนี้ไปใช้งาน

ตัวอย่างของลักษณะของการสวิตช์แบบชานน์พีคดับทวิเอ็มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 ข้อดีของการสวิตช์แบบนี้คือ สามารถลดขนาดของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำได้ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นลดน้อยลง แต่มีข้อเสียคือ ให้ค่าองค์ประกอบแรงดันเอาต์พุตของความถี่มูลฐานน้อยลง



รูปที่ 2.1 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบชานน์พีคดับทวิเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz ในการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทร็ดฮาร์โมนิกอินเจกชัน(3<sup>th</sup> Harmonic Injection PWM, HIPWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการคล้ายกับเทคนิคการสวิตช์แบบชายน้ชอย เพียงแต่เปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงแบบชายน้เป็นรูปคลื่นแบบชายน้ร่วมกับองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 แทนแล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์(สามเหลี่ยม)ที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์เหมือนเดิม สำหรับสมการรูปคลื่นและค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{control,a} = \frac{2}{\sqrt{3}} m_a (\sin(\omega t) + a \sin(3\omega t)) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $0 \leq \omega t \leq 2\pi$  และ  $a$  เป็นค่าคงที่

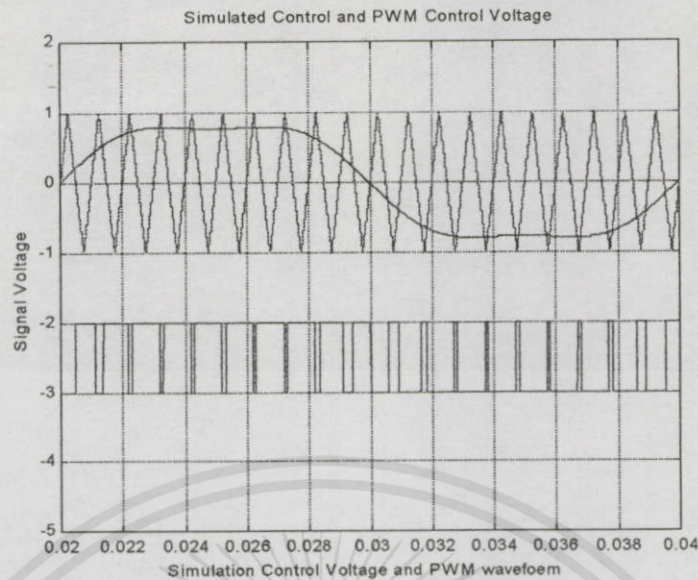
ค่า  $a$  ที่มีข้อแนะนำที่เหมาะสมคือ  $\frac{1}{6}$  [4] ส่วนสัญญาณอ้างอิงเฟส  $b$  และ  $c$  จะต่างเฟสจากสัญญาณอ้างอิง  $v_{control,a}$  เป็น 120 และ 240 องศาตามลำดับ สามารถสรุปเขียนสัญญาณควบคุมทั้งสามเฟสในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{control,a} &= \frac{2}{\sqrt{3}} m_a (\sin(\omega t) + \frac{1}{6} \sin(3\omega t)) \\ v_{control,b} &= \frac{2}{\sqrt{3}} m_a (\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3(\omega t - \frac{2\pi}{3}))) \\ v_{control,c} &= \frac{2}{\sqrt{3}} m_a (\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3(\omega t - \frac{4\pi}{3}))) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ในย่านการทำงานของสัญญาณควบคุมแบบนี้จะเหมือนกับการควบคุมแบบชายน้ คือ มีสองย่านได้แก่ ย่านลิเนียร์มอดูเลชัน และ ย่านโอเวอร์มอดูเลชัน แต่เนื่องจากคุณลักษณะของรูปคลื่นที่มีช่วงกลางแบนลงจึงให้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าประมาณ 15.5% [6] ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ช่วงการใช้งานในย่านลิเนียร์มีค่าสูงกว่าแบบชายน้

ตัวอย่างของลักษณะของการสวิตช์แบบชายน้พีดับบลิวเอ็มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบเคิร์คฮาร์โมนิกส์ อินเจ็คชั่น ที่ค่ามอดูเลชันอินเจ็คซ์

เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz

### 2.2.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector PWM, SVPWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการสวิตช์ที่วิเคราะห์จากสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ที่มีการวิเคราะห์และสร้างขึ้นโดยมีรายละเอียดใน [1] แรงดันควบคุมของเทคนิคนี้สามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$v_{control,A} = \sin(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{3}\pi} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{[(2r+1) - \frac{1}{3}][2r+1 + \frac{1}{3}]} \sin[(2r+1)3\omega t] \quad (2.7)$$

โดยสามารถเขียนสมการสัญญาณอ้างอิงอย่างง่ายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{control,A} = m_a \sqrt{3} \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ} \quad 0 \leq \omega t \leq \pi/6$$

$$m_a \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad \text{เมื่อ} \quad \pi/6 \leq \omega t \leq \pi/2$$

$$m_a \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad \text{เมื่อ} \quad \pi/2 \leq \omega t \leq 5\pi/6$$

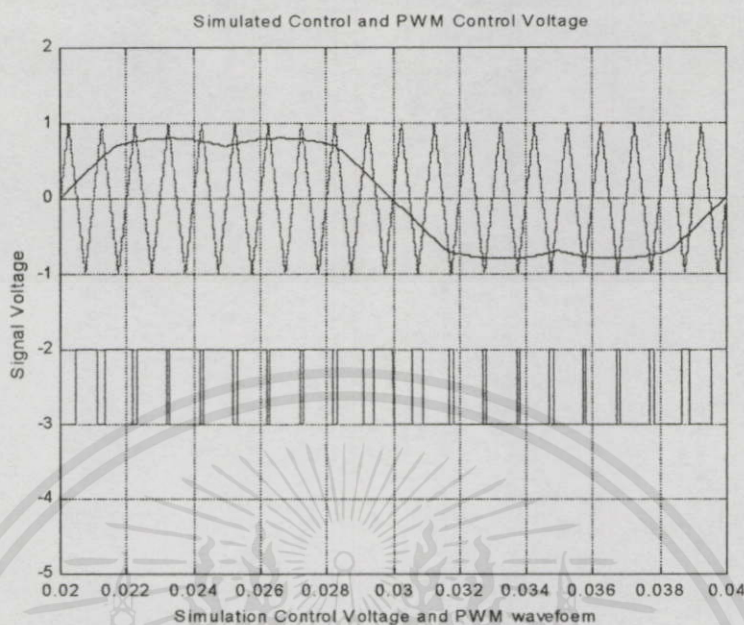
$$m_a \sqrt{3} \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ} \quad 5\pi/6 \leq \omega t \leq 7\pi/6$$

$$m_a \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad \text{เมื่อ} \quad 7\pi/6 \leq \omega t \leq 3\pi/2$$

$$m_a \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad \text{เมื่อ} \quad 3\pi/2 \leq \omega t \leq 11\pi/6$$

$$m_a \sqrt{3} \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ} \quad 11\pi/6 \leq \omega t \leq 2\pi \quad (2.8)$$

ตัวอย่างของลักษณะของการสวิตช์แบบชานน์พีคดับลิวเอ็มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบสเปกเตอร์พีคดับลิวเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz

ในย่านการทำงานของสัญญาณควบคุมแบบนี้จะเหมือนกับการควบคุมแบบชานน์ คือ มีสองย่านแต่เนื่องจากคุณลักษณะของรูปคลื่นที่มีช่วงกลางแบนลงจึงให้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าประมาณ 15.5% ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เดียวกัน เช่นเดียวกับเทคนิคแบบ HIPWM

#### 2.2.4 เทคนิคพีคดับลิวเอ็มแบบดิสคอนตินิวอัส พีคดับลิวเอ็ม (Discontinuous PWM, DPWM)

เทคนิคการสวิตช์แบบนี้จะอาศัยลักษณะของสัญญาณอ้างอิงที่ไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือ จะมีช่วงหนึ่งของสัญญาณที่มีค่าระดับสัญญาณเป็น 0 หรือเท่ากับระดับของสัญญาณแคเรียร์ที่นำมาเปรียบเทียบกับ ทำให้มีช่วงหนึ่งใน 1 รอบของคาบเวลาความถี่มูลฐานที่ไม่มีการสวิตช์ ถึงแม้ว่าลักษณะของสัญญาณแบบ DPWM นี้จะไม่สมมาตร แต่เมื่อนำสัญญาณอ้างอิง 2 เฟสต่างกันมาลบกันจะได้สัญญาณรูปชานน์เสมอ ทั้งนี้เพื่อให้ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ต้องการหักล้างกันหมด อย่างไรก็ตาม เทคนิคการสวิตช์แบบนี้ยังให้ข้อดีที่เหมือนกับเทคนิคการสวิตช์แบบ HIPWM และ SVPWM คือให้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าเทคนิคแบบ SPWM ประมาณ 15.5% ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ การที่สวิตช์มีช่วงเวลาหยุดการสวิตช์ใน 1 รอบการทำงานทำให้ความสูญเสียในการสวิตช์ลดลง, ความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตช์ลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานดีขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเทคนิคการสวิตช์แบบดิสคอนตินิวอัส พีคดับลิวเอ็ม 2 รูปแบบ คือ

### 2.2.4.1 เทคนิคคิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 120 องศา

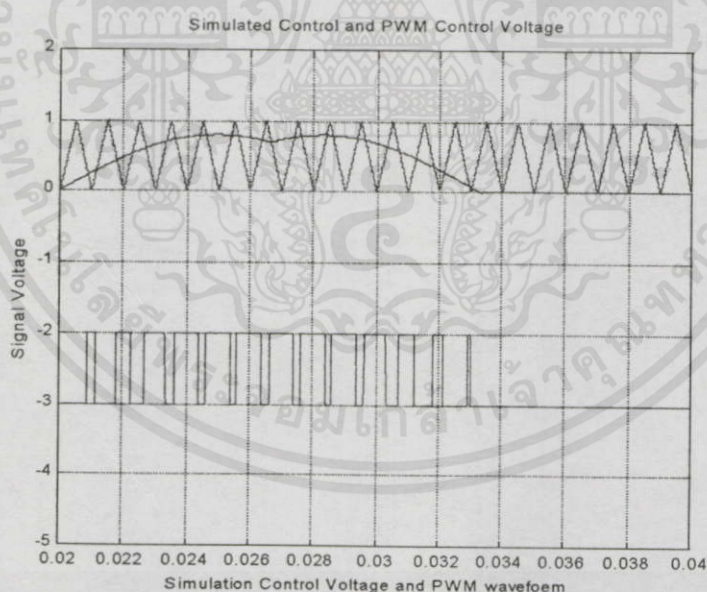
เป็นเทคนิคการสวิตช์ที่มีช่วงไม่มีการสวิตช์ เป็นช่วง 120 องศา 1 ช่วง ซึ่งมีสมการของสัญญาณอ้างอิงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 v_{control,a} &= m_a \sin(\omega t) & : & \quad 0 \leq \omega t \leq 2\pi/3 \\
 & m_a \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) & : & \quad 2\pi/3 \leq \omega t \leq 4\pi/3 \\
 & 0 & : & \quad 4\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

### 2.2.4.2 เทคนิคแบบเจนเนอเรชัน คิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม

เป็นเทคนิคการสวิตช์ที่มีช่วงไม่มีการสวิตช์เป็นช่วง 120 องศาเช่นเดียวกัน แต่มีลักษณะของรูปคลื่นดังนี้คือ รูปคลื่นได้จากการรวมสัญญาณพื้นคาเมนทอกกับสัญญาณซีโรซีควีน (Zero Sequence Signal)

ตัวอย่างของการสวิตช์ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบคิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 120 องศาและแบบเจนเนอเรชัน คิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 30 องศาแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



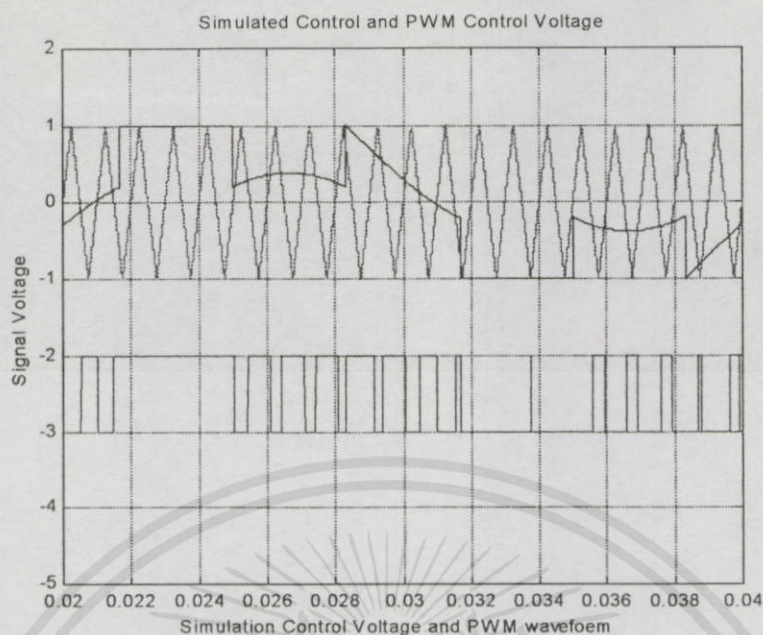
รูปที่ 2.4 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบคิสคอนตินิวอัส พีดับบลิวเอ็ม 120 องศา ที่ค่ามอดูเลชัน

อินดิเคชันเท่ากับ 0.8, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแค

เรเซอร์ = 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะตัวอย่างการสวิตช์แบบเงินเนอโรเซชัน คิสคอนตินิวอัส ที่ดับบลิวเอ็ม 30 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.80, ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ = 1kHz

### 2.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและคุณสมบัติของรูปคลื่นสัญญาณ

การวิเคราะห์ในเรื่องของค่าดัชนีที่ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตทั้งแรงดันและกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอาศัยทฤษฎีของอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งเป็นอนุกรมที่สามารถใช้วิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ได้ ซึ่งตามทฤษฎีสามารถอธิบายได้ดังนี้[7]

ฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ทั่วไป จะสามารถเขียนอยู่ในรูปอนุกรมได้ดังสมการที่ 2.10

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.11)$$

ในส่วนของค่า  $a_n$  และ  $b_n$  จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบไซน์และโคไซน์ตามลำดับ ซึ่งจากการรวมสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถเขียนได้อีกรูปหนึ่งในสมการที่ 2.12

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ และ } \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.10 ถึง 2.13 เมื่อนำไปวิเคราะห์รูปคลื่นจะได้ค่าดัชนีต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1[7]

ตารางที่ 2.1 นิยามของดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพรูปคลื่นเอาต์พุต

ค่า	นิยาม	ค่า	นิยาม
$THD_v$	$100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} (\%)$	$THD_i$	$100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} (\%)$
$V_{I_{rms}}$	$(V_{peak})/\sqrt{2}$	$I_{I_{rms}}$	$(I_{peak})/\sqrt{2}$
$V_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$	$I_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$
$DF_1$	$100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{h^2}}}{V_1} (\%)$	$DF_2$	$100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{h^4}}}{V_1} (\%)$

เมื่อ  $V_h$  : ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  (r.m.s.),

$I_h$  : ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  (r.m.s.)

$THD_v$  : ค่า total harmonics distortion ของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$THD_i$  : ค่า total harmonics distortion ของกระแส

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$DF_1$  : ค่าคิสทอร์ชันแฟลคเตอร์ด้านฝั่งเอซี สำหรับที่มีการฟิลเตอร์แบบลำดับที่ 1

$DF_2$  : ค่าคิสทอร์ชันแฟลคเตอร์ด้านฝั่งเอซี สำหรับที่มีการฟิลเตอร์แบบลำดับที่ 2

ค่า Total Harmonic Distortion ( $THD$ ) ทั้งของแรงดัน ( $THD_v$ ) และของกระแส ( $THD_i$ ) เป็นดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างจากองค์ประกอบแรงดันหรือกระแสความถี่มูลฐาน ในการหาค่า  $THD$  นี้จะต้องอาศัยการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์ เพื่อหาองค์ประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกซ์ของรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุต จึงสามารถนำไปเข้าสู่ครและหาค่าออกมาได้ เปอร์เซนต์  $THD$  หากมีค่ามากแสดงว่ารูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยนมาก

ค่า อาร์.เอ็ม.เอส ขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน ทั้ง แรงดัน ( $V_{rms}$ ) และกระแส ( $I_{rms}$ ) เป็นค่าระดับแรงดันและกระแส อาร์.เอ็ม.เอส ที่ความถี่มูลฐานซึ่งมีความถี่ที่ใช้งานของอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ องค์ประกอบนี้จะเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังไฟฟ้าและเป็นองค์ประกอบที่ต้องการใช้งาน

ค่า อาร์.เอ็ม.เอส ของแรงดัน ( $V_{rms}$ ) และกระแส ( $I_{rms}$ ) เอาต์พุตเป็นค่าระดับแรงดันและกระแส อาร์.เอ็ม.เอส ของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งเป็นค่ารวมขององค์ประกอบทุกตัวทั้งความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกซ์

สำหรับค่า  $DF_2$  ที่นิยามในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นค่าคิสทอร์ชันแฟคเตอร์ที่มีตัวหารลดทอนสัญญาณขนาดเท่ากับ  $h^2$  เมื่อ  $h$  เป็นเลขลำดับของฮาร์มอนิกซ์ ค่านี้จะใช้ในการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนจากการต่อโหลดชนิดฟิลเตอร์แบบลำดับที่ 2 (Second-Order Filter) ตัวอย่างเช่นแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง (UPS) โดยมากมักมีวงจรฟิลเตอร์แบบ LC ชนิดลำดับที่ 2 อยู่ระหว่างชุดอินเวอร์เตอร์กับโหลด ซึ่งฟิลเตอร์ดังกล่าวจะมีการลดทอนฮาร์มอนิกซ์แปรผันตามกำลังสองของลำดับฮาร์มอนิกซ์ ( $h$ ) ทำนองเดียวกัน สำหรับโหลดชนิดฟิลเตอร์ลำดับที่ 1 เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำเอซี ซึ่งจะมีอินดักแตนซ์ที่ตัวฮาร์โมนีเจอร์และลีดเกจ อินดักแตนซ์เหล่านี้เปรียบเหมือนกับการลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกซ์โดยแปรผันตามลำดับฮาร์มอนิกซ์ ( $h$ ) ดังนั้นในการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนจึงใช้ค่า  $DF_1$

## 2.4 ทฤษฎีการทำนายกระแสจากรูปคลื่นแรงดัน (Prediction Method)

วิธีการทำนายรูปคลื่นกระแสจะใช้วิธีการทำนายรูปคลื่นกระแส (Prediction Method) จากรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต โดยสมการวิเคราะห์ทั่วไปแล้วรูปคลื่นกระแสจะขึ้นอยู่กับโหลดและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ดังนั้นจึงสามารถใช้หลักการนี้ในการวิเคราะห์หารูปคลื่นกระแสและสามารถวิเคราะห์หาคุณลักษณะในแกนความถี่ได้โดยใช้ทฤษฎีของ Fast Fourier Transform (FFT)

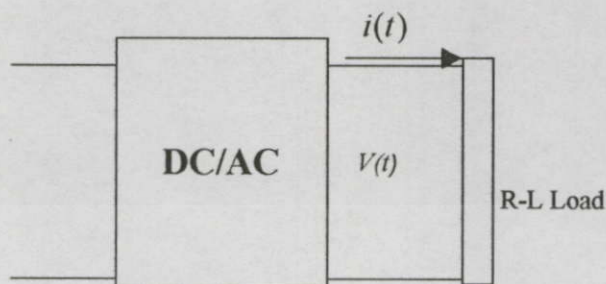
สำหรับการอธิบายการทำนายรูปคลื่นกระแสจากรูปคลื่นแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารชุดสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

อธิบายได้ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้จัดทำมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่  $v(t)$  แทนฟังก์ชันของแรงดันและ  $i(t)$  แทนฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเนื่องมาจากโหลดที่เป็น R-L เขียนได้ดังนี้

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์และสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการทำนายกระแส

จากสมการที่ 2.14 พิจารณาเทอมอนุพันธ์จะได้เป็นดังสมการที่ 2.15

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{dt} \quad (2.15)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.15 โดยการแก้สมการสามารถแสดงผลของกระแสได้ดังสมการที่ 2.16 ดังนี้

$$\begin{aligned} v(t + \Delta t) &= Ri(t + \Delta t) + \frac{L \{i(t + \Delta t) - i(t)\}}{dt} \\ &= Ri(t + \Delta t) + \frac{Li(t + \Delta t)}{dt} - \frac{Li(t)}{dt} = i(t + \Delta t) \left[ R + \frac{L}{dt} \right] - L \frac{i(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.16)$$

ดังนั้น

$$i(t + \Delta t) = \frac{v(t + \Delta t) + \frac{Li(t)}{dt}}{R + \frac{L}{dt}} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าสามารถทำนายค่าขนาดกระแสที่เวลาถัดไปโดยอาศัยกระแสที่  
ไม่ว่าค่าจำนวนได้ในปัจจุบันนี้ ซึ่งเมื่อทำขั้นตอนดังกล่าวซ้ำกันจนเพียงพอจะสามารถหาขนาดกระแสที่ถูก

ต้องได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้จะสามารถทำนายรูปคลื่นกระแสจากแรงดันไฟฟ้าในภาวะสัญญาณคงตัว (Steady State) เท่านั้น

## 2.5 ผลของเดดไทม์ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ช่วงเวลาเดดไทม์เป็นช่วงเวลา ที่จำเป็นต่อการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เนื่องจากการทำงานของสวิตช์ในสาขาเดียวกันจะต้องไม่นำกระแส (Turn On) พร้อมกัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีช่วงเวลาที่เล็กน้อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการสวิตช์ ช่วงเวลาเดดไทม์จะทำให้เกิดแรงดันผิดพลาด (Error Voltage) ขึ้น

ผลของเดดไทม์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.7 จากรูปพิจารณาสัญญาณเกต G1, G2 ใช้สำหรับควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ T1, T2 ตามลำดับส่วน ไดโอด D1, D2 เป็นไดโอดที่ต่อขนานกับอุปกรณ์สวิตซ์ดังรูปเพื่อให้เกิดกระแสต่อเนื่องในกรณีที่โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ พิจารณาการเกิดผลของเดดไทม์ตามทิศทางกระแสซึ่งได้มีการอธิบายไว้ใน [3]

กรณีที่ กระแส  $i_A$  มีค่าเป็นบวก (ไหลออกจากโหนด A)

ขณะที่  $T_2$  กำลังหยุดนำกระแส (Turn Off) กระแส  $i_A$  ไหลจากจุด - ไปยังจุด A เมื่อ  $T_2$  หยุดนำกระแสแล้วในอุดมคติ  $T_1$  จะนำกระแสทันทีแรงดัน ณ จุด A ในอุดมคติจะเป็น  $+V_{DC}$  แต่ในการทำงานจริง ก่อนที่  $T_1$  จะนำกระแสจะมีช่วงเวลาเดดไทม์อยู่ในช่วงนี้ เพื่อให้กระแส  $i_A$  ไหลอย่างต่อเนื่อง ไดโอด  $D_2$  จะนำกระแสแทนทำให้แรงดันที่จุด A ในช่วงเวลานี้เป็น  $-V_{DC}$  ทำให้เกิด loss ทางแรงดัน

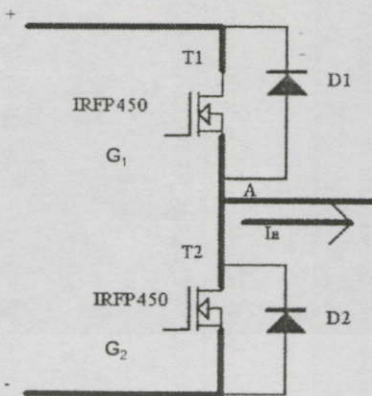
ในช่วงนี้ ในช่วงที่  $T_1$  กำลังหยุดนำกระแสจะไม่มีผลเนื่องจาก เมื่อ  $T_1$  หยุดนำกระแสและ  $T_2$  ยังไม่หยุดนำกระแสและ  $T_2$  ยังไม่นำกระแสเนื่องจากช่วงเวลาเดดไทม์ ไดโอด  $D_2$  จะนำกระแสทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง ทำให้แรงดัน  $-V_{DC}$  ตกคร่อมซึ่งจะตรงกันกับอุดมคติ

กรณีที่ กระแส  $i_A$  มีค่าเป็นลบ (ไหลเข้าโหนด A)

ขณะที่  $T_1$  กำลังหยุดนำกระแส กระแส  $i_A$  ไหลจากจุด A ไปยังจุด + เมื่อ  $T_1$  หยุดนำกระแสแล้วในอุดมคติ  $T_2$  จะนำกระแสทันที แรงดัน ณ จุด A ในอุดมคติจะเป็น  $-V_{DC}$  แต่ในการทำงานจริง ก่อนที่  $T_2$  จะนำกระแสจะมีช่วงเวลาเดดไทม์อยู่ในช่วงนี้เพื่อให้กระแส  $i_A$  ไหลอย่างต่อเนื่อง ไดโอด  $D1$  จะนำกระแสแทนทำให้แรงดันที่จุด A ในช่วงนี้เป็น  $+V_{DC}$  ทำให้เกิด Gain ทางแรงดัน

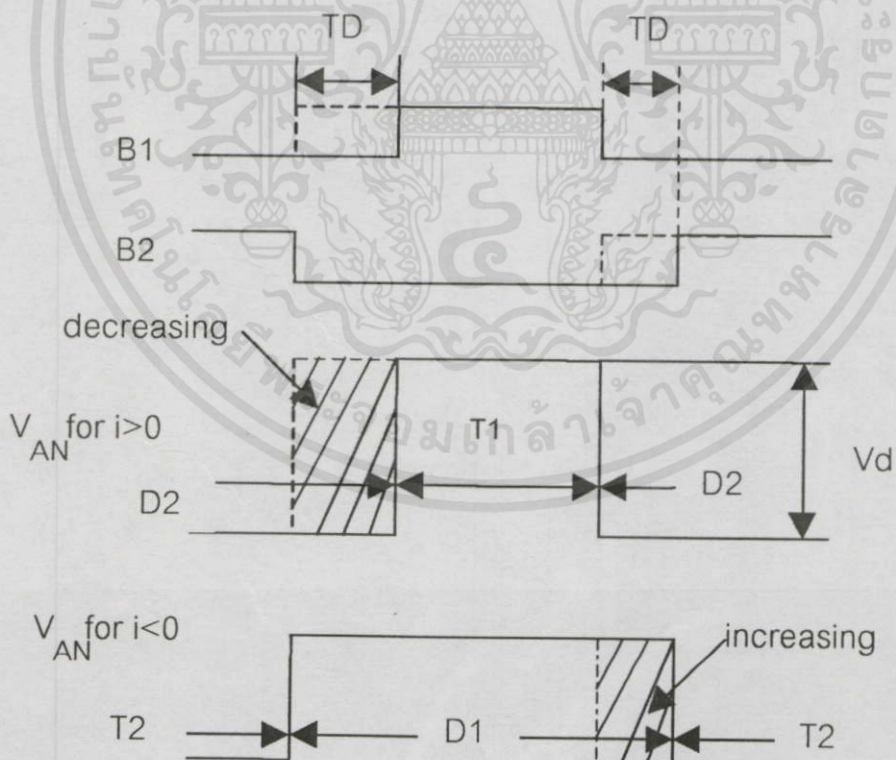
ในช่วงที่  $T_2$  กำลังหยุดนำกระแส จะไม่มีผลเนื่องจาก เมื่อ  $T_2$  หยุดนำกระแส และ  $T_1$  ยังไม่นำกระแสเนื่องจากช่วงเวลาเดดไทม์ ไดโอด  $D1$  จะนำกระแสทำให้แรงดัน  $+V_{DC}$  ตก ณ จุด A ซึ่งจะตรงกันกับอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวน เวลสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษารวเรียน มิออนุญให้เ็นไปขงบระ เวชณคานการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์ใน 1 สาขาทั่วไป

สัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางไหลของกระแสในสาขานั้นซึ่งสามารถพิจารณาโดยสรุปได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจากรูป 2.8 จะเห็นได้ถึงสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ซ้ำ หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 2.8 ลักษณะของแรงดันผิดพลาดที่เกิดขึ้น ตามทิศทางกระแสไหลของกระแสในสาขา

จาก [5] ได้ทำการประมาณค่าแรงดันผิดพลาดไว้ดังนี้

Approximated Error Voltage

$$\begin{aligned} &\approx \frac{2t_{\Delta}}{T_s} V_d && \text{ถ้า } i_A > 0 \\ &-\frac{2t_{\Delta}}{T_s} V_d && \text{ถ้า } i_A < 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $V_d$  คือ แรงดันดีซีลิงค์,  $T_s$  คือ คาบเวลาของความถี่การสวิตช์ และ  $t_{\Delta}$  คือ ช่วงเวลาเดดไทม์สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้โปรแกรม MATLAB และการวิเคราะห์จากรูปคลื่นสัญญาณ โดยตรง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยการประมาณค่าในสมการหาค่าแรงดันผิดพลาด แต่จะใช้การวิเคราะห์ โดยหา  $v_{actual}$  แทน โดยค่าแรงดันผิดพลาดที่วิเคราะห์ได้จะได้มาจาก

$$Error\ Voltage = v_{ideal} - v_{actual} \quad (2.19)$$

$v_{ideal}$  คือ รูปคลื่นแรงดันอุดมคติ

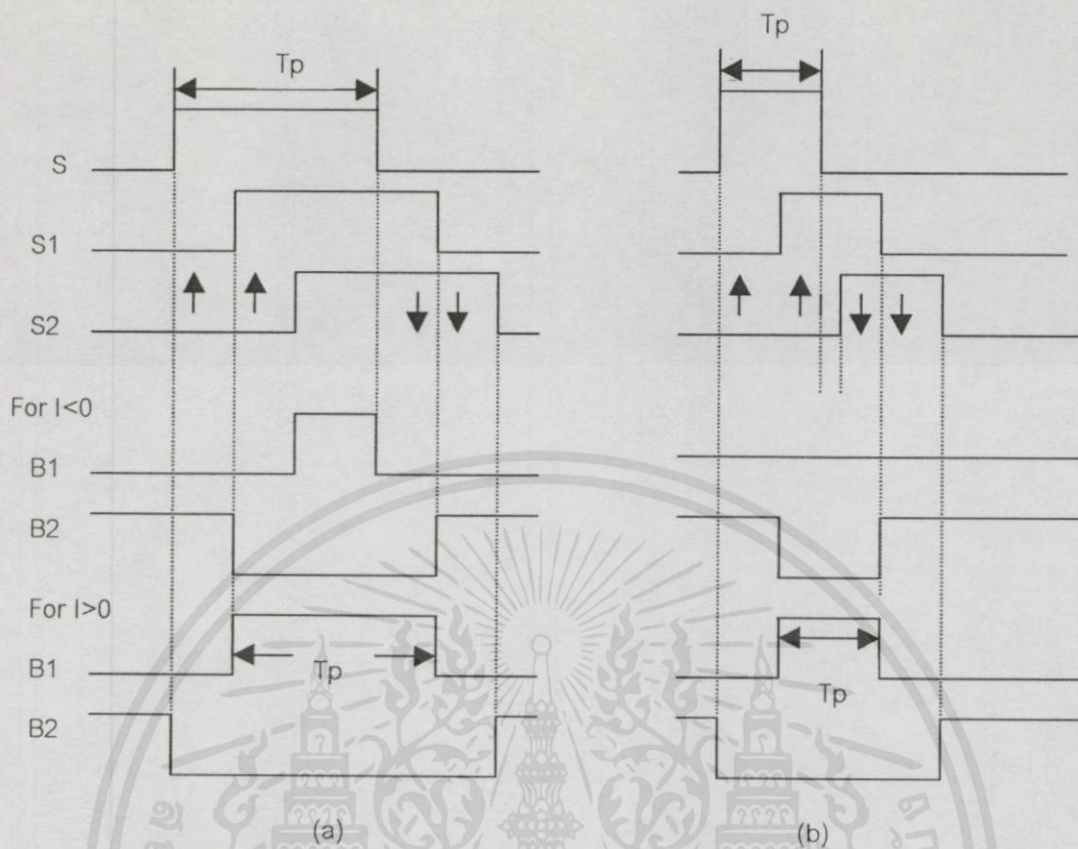
$v_{actual}$  คือ รูปคลื่นแรงดันจริง

## 2.6 เทคนิคการชดเชยผลของเดดไทม์ในวงจรอินเวอร์เตอร์

สำหรับเทคนิคการชดเชยผลของเดดไทม์นั้น Seung-Gi Jeong และ Min-Ho Park ได้อธิบายไว้ [3] โดยการชดเชยผลสามารถทำได้โดยปรับเปลี่ยนสัญญาณทริกให้มีการชดเชยผลของเดดไทม์ที่เกิดขึ้น โดยวิเคราะห์จาก ตำแหน่งที่มีสัญญาณผิดพลาดเกิดขึ้นทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลงก็ทำการเพิ่มเนื้อพัลส์ ส่วนตำแหน่งที่แรงดันผิดพลาดทำให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นก็ลดเนื้อพัลส์ลงตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปสมการที่นำมาสร้างสัญญาณควบคุมที่มีการชดเชยผลของเดดไทม์ไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} B1 &= I \cdot S1 + S \cdot S1 \cdot S2 \\ B2 &= \bar{I} \cdot \bar{S1} + \bar{S} \cdot \bar{S1} \cdot \bar{S2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ตัวอย่างของสัญญาณที่มีการชดเชยผลของเดดไทม์แสดงดังรูปที่ 2.9 ลักษณะของสัญญาณที่สร้างขึ้นในรูปที่ 2.9 จะอาศัยสัญญาณรูปคลื่นในอุดมคติ (S) มาทำการเลื่อนเฟสออกไปเป็นระยะเท่ากับช่วงเวลาเดดไทม์ (Td) และ สองเท่าของช่วงเวลาเดดไทม์ ซึ่งจะได้เป็นสัญญาณ S1 และ S2 ตามลำดับ จากนั้นจะนำสัญญาณควบคุมดังกล่าวมาเข้าวงจรลอจิกตามสมการที่ 2.20 เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ ในกรณีที่สัญญาณรูปคลื่นมีความกว้างพัลส์น้อยกว่าสองเท่าของช่วงเวลาเดดไทม์จะไม่มีการใช้เอาต์พุต อีกทั้งห้ามมิให้เดดเวลาก่อนหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไทม์จะได้สัญญาณในรูปที่ 2.9 (b)



รูปที่ 2.9 สัญญาณควบคุมที่มีการชดเชยผลของเดดไทม์ (a)  $T_p > 2T_d$  (b)  $T_p < 2T_d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การวิเคราะห์และออกแบบสัญญาณโดยโปรแกรม MATLAB

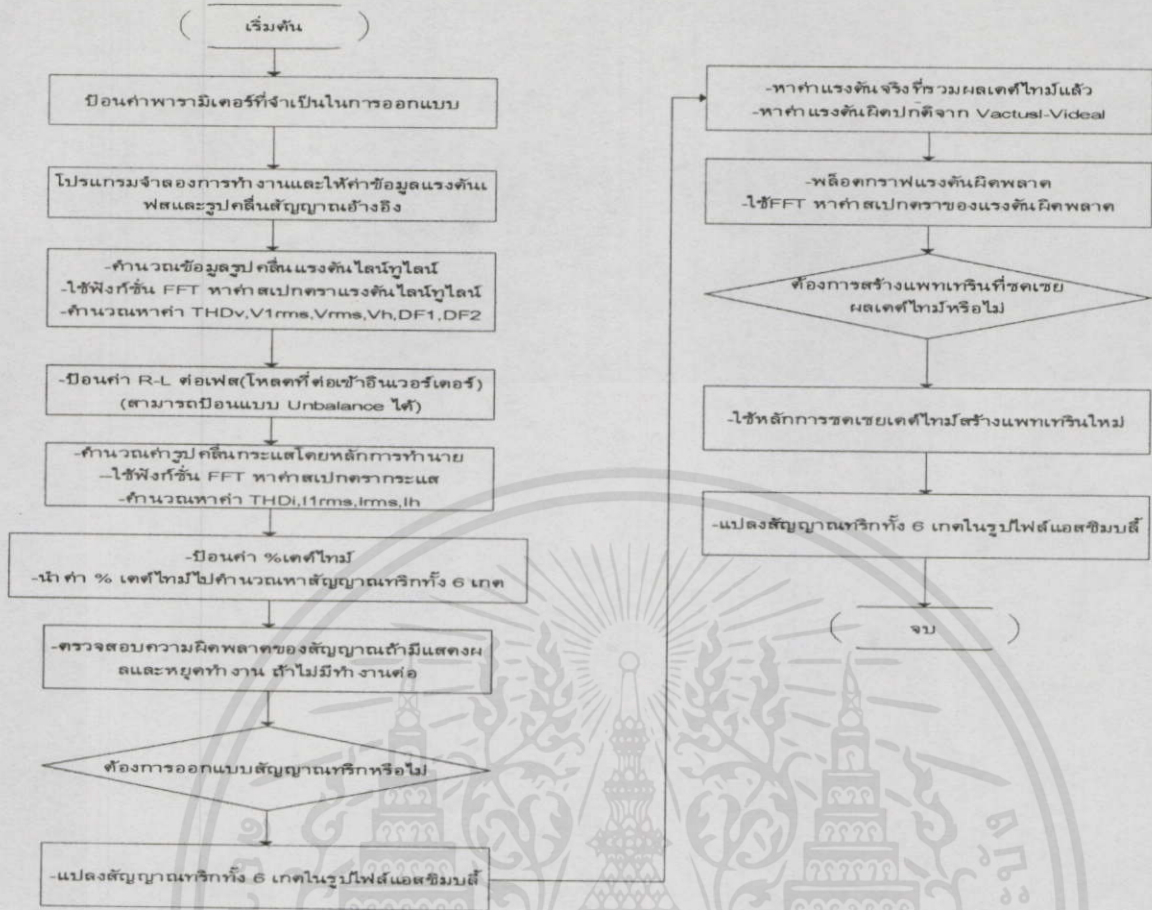
### 3.1 บทนำ

โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบนี้อาศัยโปรแกรม MATLAB รวมถึงส่วน SIMULINK ของ MATLAB ด้วย ด้วยความสะดวกในการเขียนโปรแกรมแบบ Block Diagram ทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมได้ง่ายและรวดเร็ว การเขียนโปรแกรมในวิชานี้นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มซึ่งเขียนอยู่ในรูปโปรแกรม SIMULINK และส่วนวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปของไฟล์โปรแกรม MATLAB

การวิเคราะห์จำลองผลการทำงานจะรวมผลอันเนื่องมาจากเดค้ไทม์ และความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณในแบบดิจิทัลด้วย ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในโปรแกรมที่ออกแบบนี้ยังไม่รวมผลของแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์เข้าไปด้วย จึงยังทำให้การวิเคราะห์บางส่วนไม่ถูกต้องนัก ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 3.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

แผนผังการทำงานของโปรแกรมออกแบบและสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็ม แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 เมื่อผู้ใช้งานป้อนค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้างสัญญาณแพทเทรินเข้าสู่โปรแกรมส่วน SIMULINK แล้วด้วยโปรแกรมที่ออกแบบไว้ จะทำการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟสเป็นอันดับแรก โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณแคเรียร์ จากนั้นจะทำการเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มออกไป 120 และ 240 องศาตามลำดับเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าครบทั้งสามเฟส ข้อมูลของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้จะถูกเก็บไว้ในรูปเมตริกซ์ในไฟล์สกุล .mat ซึ่งเป็นไฟล์ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ต่อในโปรแกรม MATLAB ได้ ในส่วนของโปรแกรม MATLAB ที่เขียนขึ้นจะให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับค่าเดค้ไทม์, ค่าอิมพีแดนซ์ ฯลฯ ที่เกี่ยวกับวงจรเพิ่มเติม จากนั้นโปรแกรมจะนำข้อมูลจากไฟล์ .mat และพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้ป้อนไปวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีเกี่ยวกับ FFT, การทำนายรูปคลื่นกระแส, ผลของเดค้ไทม์ รวมทั้งการคำนวณค่าดัชนีคุณภาพของรูปคลื่นต่างๆ ผลที่ได้จากโปรแกรมจะอยู่ในรูปของรูปคลื่นสัญญาณ, สเปกตรา, ดัชนีชี้คุณภาพต่างๆ รวมถึงไฟล์ข้อมูลในรูปภาษาแอสแซมบลีที่บรรจุรูปคลื่นที่มีเดค้ไทม์ไว้แล้ว หากผู้ใช้ต้องการให้โปรแกรมออกแบบสัญญาณที่จะนำไปใช้กับวงจรชุดผลของเดค้ไทม์ ก็จะสามารถเลือกได้โดย โปรแกรมจะสร้างสัญญาณเกตที่เป็นตามอุดมคติ(ไม่มีเดค้ไทม์) 3 ชุดให้แทนสัญญาณเกตในรูปเมตริกซ์จะถูกแปลงเป็นเลขฐาน 16 และเขียนเป็นไฟล์แอสแซมบลีเพื่อนำไปใช้ควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้ได้โดยง่าย



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมออกแบบ และสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีคดับลิแวนซ์

ส่วนต่างๆของโปรแกรมสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

### 3.2.1 ส่วนอินพุต

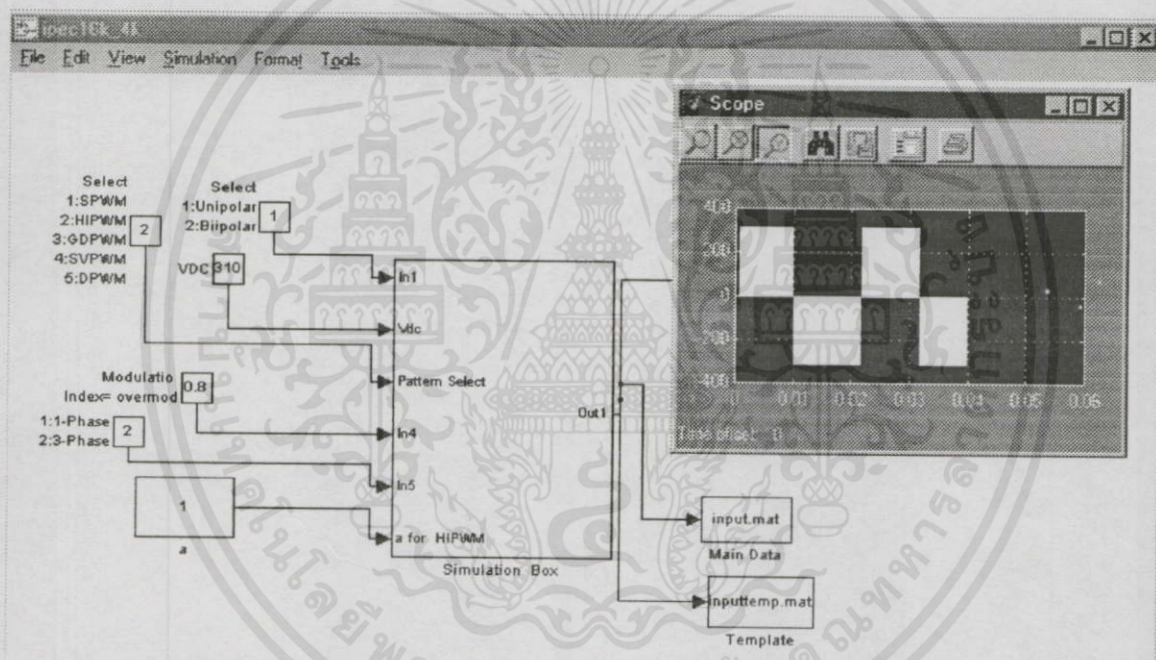
ตารางที่ 3.1 แสดงสรุปอินพุตที่ป้อนเข้าโปรแกรมที่ออกแบบ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ ส่วนหนึ่งของส่วนป้อนสัญญาณอินพุต แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นส่วนป้อนโปรแกรมจากส่วนโปรแกรม SIMULINK ส่วนค่าอื่นๆ ผู้ใช้จะสามารถป้อนโดยพิมพ์ค่าตัวเลขในภายหลัง เมื่อ RUN โปรแกรมส่วน MATLAB การป้อนอินพุตพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถทำได้โดยง่ายเนื่องจากโปรแกรมที่ออกแบบขึ้นติดต่อกับผู้ใช้บนระบบปฏิบัติการ Window และมีการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานเมื่อมีการป้อนข้อมูลคิด ในส่วนของการป้อนข้อมูลผ่านทางโปรแกรม MATLAB สามารถทำได้โดยง่ายเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.3 ค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าไปแล้วจะถูกนำไปประมวลผลและคำนวณค่าเอาต์พุตต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์อินพุตทั้งหมดที่จำเป็นในการวิเคราะห์ของโปรแกรม

แพทเทิร์น	Modulation Index (0-overmod)	Impedance Load angle	Compensated/ No	Deadtime (2-10 %)	Switching Frequency	DC link voltage (V)
SPWM,HIPWM, DPWM 120, GDPWM 60, SVPWM	Xi	Xi	Y/N	Xi	Xi	Xi

Y/N : ใช่/ไม่ใช่ Xi : ป้อนค่าตัวเลข



รูปที่ 3.2 ส่วนป้อนอินพุตของโปรแกรมจากส่วน SIMULINK

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
>>
>>
>> synthesis
Please Enter Impedance of Phase a68
Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase a0.8
Please Enter Impedance of Phase b68
Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase b0.8
Please Enter Impedance of Phase c68
Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase c0.8
Please Enter Connecting 1:star 2: delta2
    
```

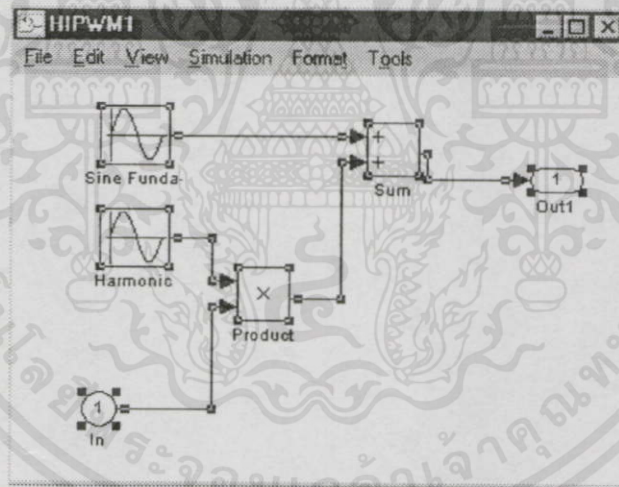
รูปที่ 3.3 ส่วนป้อนอินพุตของโปรแกรมจากส่วน MATLAB

### 3.2.2 ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็ม

เมื่อส่วน SIMULINK รับค่าพารามิเตอร์จากส่วนอินพุตที่ผู้ใช้โปรแกรมป้อนข้อมูลและตั้งเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะทำสร้างสัญญาณควบคุมโดยอาศัยบล็อกต่างๆ ในการสร้างสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็ม 3 เฟส ซึ่งในแต่ละบล็อกจะประกอบด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น ซึ่งมีบล็อกที่สำคัญในโปรแกรมหาดังนี้

#### 3.2.2.1 บล็อกสร้างสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็ม

โปรแกรมในส่วนนี้จะทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงที่สร้างได้จากสมการคณิตศาสตร์หรือทฤษฎีรูปคลื่นต่างๆ โดยจะมีข้อมูลที่ป้อนจากผู้ใช้งานเป็นคำสั่งเลือกชนิดรูปคลื่นที่จำนำออกไปประมวลผล การสร้างสัญญาณรูปคลื่นมีอยู่ 5 ชนิด ตัวอย่างในรูปที่ 3.4 จะแสดงส่วนสร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบ HIPWM ซึ่งเกิดจากการรวมกันของสัญญาณความถี่มูลฐานกับสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 3 สำหรับบล็อกส่วนสัญญาณของรูปคลื่นอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ก การเขียนโปรแกรมแบบบล็อกนี้จะพัฒนา แก้ไขและตรวจสอบโปรแกรมได้ง่าย ทำให้สะดวกในการทำงานของผู้ใช้งานและผู้เขียนโปรแกรม

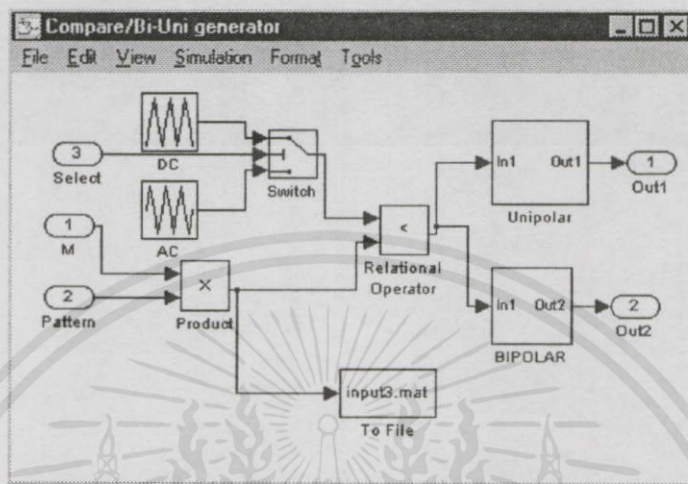


รูปที่ 3.4 ส่วนสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบ HIPWM

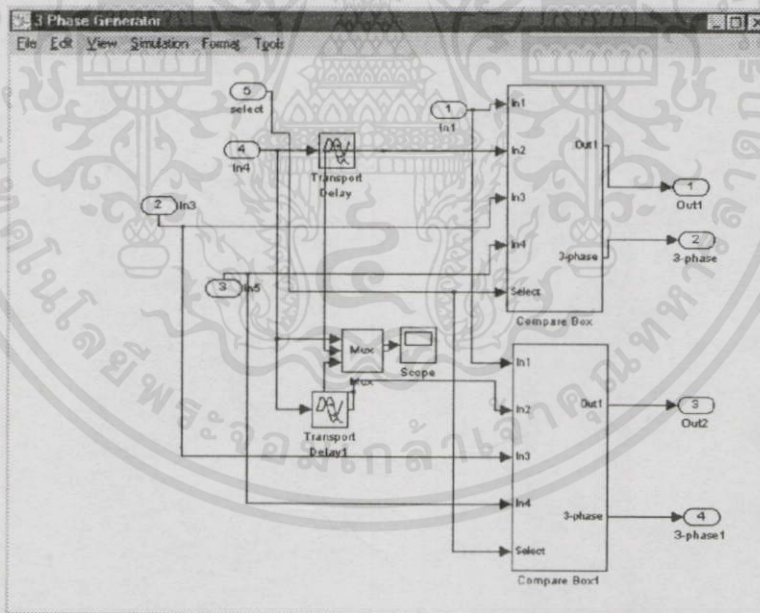
#### 3.2.2.2 บล็อกสร้างสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็ม

ในส่วนนี้จะนำสัญญาณอ้างอิง 1 เฟสไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์ที่สามารถตั้งความถี่ได้ สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้จะได้เป็นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มตามทฤษฎี เมื่อได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟส สัญญาณอ้างอิงเดียวกันจะถูกส่งไปยังส่วนสร้างสัญญาณ 3 เฟสซึ่งจะทำการเลื่อนเฟสของสัญญาณอ้างอิงออกไปเป็น 120 และ 240 องศาตามลำดับแล้วนำไปเปรียบเทียบสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มอีก 2 เฟสที่เหลือ ส่วนสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟสและส่วนเลื่อนสัญญาณอ้างอิงเป็น 3 เฟสจะแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ เมื่อนำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแต่

ละเฟสมาลบกัน และคูณด้วยแรงดันดีซีจึงได้แรงดันไลน์ทูไลน์ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเอาต์พุตเกี่ยวกับสัญญาณตรีกเกตทั้ง 3 เฟส จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ข้อมูล .mat เพื่อนำไปใช้ต่อในโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.5 ส่วนสร้างสัญญาณพีคดับลิแวม 1 เฟส



รูปที่ 3.6 ส่วนเดือนสัญญาณอ้างอิง 3 เฟส

### 3.2.3 ส่วนวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณและแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ส่วนนี้จะนำไฟล์ข้อมูลของสัญญาณตรีกเกต ทั้ง 3 เฟสมาวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีในบทที่ 2 ไม่ว่าจะวิธีใดทางสั้น ออกทั้งห้ามมีเหตุผลแบบปัญหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ โดยผู้ใช้งานจะต้องป้อนค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ ค่าอินพีแดนซ์ และเฟสที่ต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์, ลักษณะการต่อโหลด (delta หรือ star), ค่าเดไทม์, ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปวิเคราะห์ และได้

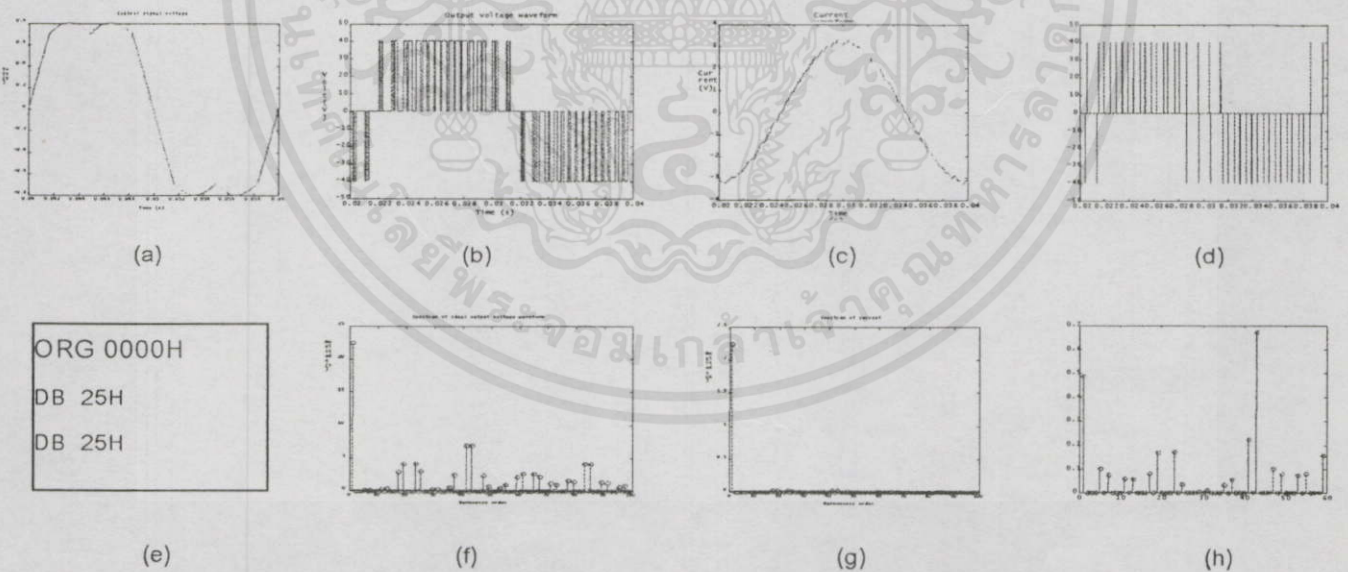
เอาต์พุต คือ ค่าดัชนีชี้คุณภาพรูปคลื่น  $THD_v$ ,  $THD_i$ ,  $DF_1$ ,  $DF_2$  ค่าคุณลักษณะของรูปคลื่น  $V_{rms}$ ,  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $I_{rms}$  สเปกตรัมแรงดันและกระแสรวมถึงรูปคลื่นแรงดัน และกระแส, ไฟล์แอสเซมบลีที่ใช้ในการควบคุมวงจรได้ทันที โดยมีเคดไทม์รวมอยู่แล้วส่วน

เอาต์พุตต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นเอาต์พุตทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์โปรแกรม ส่วนรูปที่ 3.7 จะแสดงส่วนของเอาต์พุตอื่นๆที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 3.2 แสดงเอาต์พุตทั้งหมดที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์

Select Patterns	$V_i$	$V_{rms}$	$I_i$	$I_{rms}$	$THD_i$	$THD_v$	V & I Spectra	V & I waveforms
SPWM, HIPWM, DPWM 60, DPWM 120, GDPWM, SVPWM	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	P	P

Xo : ผลแสดงเป็นค่าตัวเลข P : แสดงผลเป็นรูปคลื่นหรือสเปกตรัม

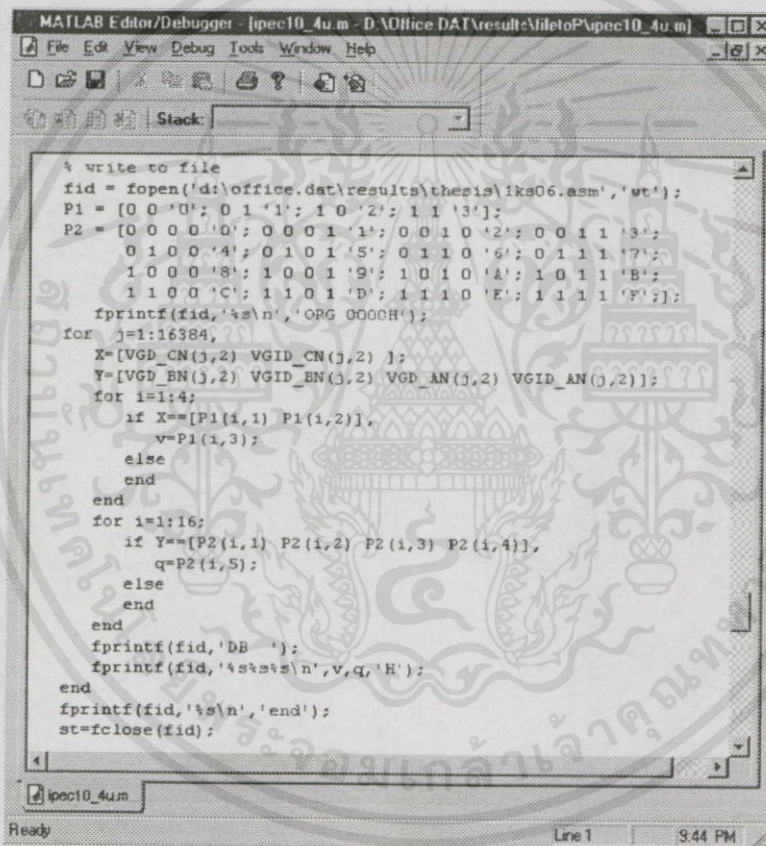


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรม (a) แรงดันอ้างอิง (b) รูปคลื่นแรงดัน (c) รูปคลื่น

กระแส (d) รูปคลื่นสัญญาณผิดพลาดจากผลของเคดไทม์ (e) แอสเซมบลีไฟล์ (f) สเปกตรัมการคำนวณค่าแรงดัน (g) สเปกตรัมการคำนวณค่ากระแส (h) ฮาร์โมนิกลำดับต่ำของแอสเซมบลีไฟล์

### 3.3 การสร้างไฟล์แอสเซมบลีในโปรแกรม MATLAB

ในการสร้างไฟล์แพทเทรินจากโปรแกรม MATLAB จะนำข้อมูลของสัญญาณทริกเกดทั้ง 6 เกด จากส่วน SIMULINK มากำหนดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์เดียวกัน จะทำการเทียบเมทริกซ์กับค่าเลขฐาน 16 เพื่อแปลงรูปสัญญาณดิจิตอล (ฐาน 2) ให้เป็นฐาน 16 จำนวนข้อมูลของ 1 แพทเทริน จะมีความยาวที่กำหนดให้มีค่าแชนเปลิ่งที่เหมาะสม ในแต่ละแชนเปลิ่งสัญญาณจะถูกเทียบกับเมทริกซ์และเขียนใส่ไฟล์อักขระ (text file) โดยเก็บในสกุล .asm ซึ่งสามารถนำไป link กับส่วนควบคุมที่เขียนโดยแอสเซมบลีได้ ตัวอย่างของโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อแปลงสัญญาณควบคุมให้อยู่ในรูปแอสเซมบลี แสดงในรูปที่ 3.7



```

MATLAB Editor/Debugger - [ipec10_4u.m - D:\Office DAT\results\filetoP\ipec10_4u.m]
File Edit View Debug Tools Window Help
Stack
% write to file
fid = fopen('d:\office.dat\results\thesis\iks06.asm','wt');
P1 = [0 0 '0'; 0 1 '1'; 1 0 '2'; 1 1 '3'];
P2 = [0 0 0 '0'; 0 0 0 1 '1'; 0 0 1 0 '2'; 0 0 1 1 '3';
      0 1 0 0 '4'; 0 1 0 1 '5'; 0 1 1 0 '6'; 0 1 1 1 '7';
      1 0 0 0 '8'; 1 0 0 1 '9'; 1 0 1 0 'A'; 1 0 1 1 'B';
      1 1 0 0 'C'; 1 1 0 1 'D'; 1 1 1 0 'E'; 1 1 1 1 'F'];
fprintf(fid,'%s\n','OPG 0000H');
for j=1:16384,
X=[VGD_CN(j,2) VGD_CN(j,2)];
Y=[VGD_BN(j,2) VGD_BN(j,2) VGD_AN(j,2) VGD_AN(j,2)];
for i=1:4;
if X==[P1(1,1) P1(1,2)],
v=P1(1,3);
else
end
end
for i=1:16;
if Y==[P2(1,1) P2(1,2) P2(1,3) P2(1,4)],
q=P2(1,5);
else
end
end
fprintf(fid,'DB ');
fprintf(fid,'%s%s\n',v,q,'H');
end
fprintf(fid,'%s\n','end');
st=fopen(fid);
  
```

รูปที่ 3.7 ส่วนของโปรแกรมที่แปลงสัญญาณควบคุมเป็นไฟล์แอสเซมบลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

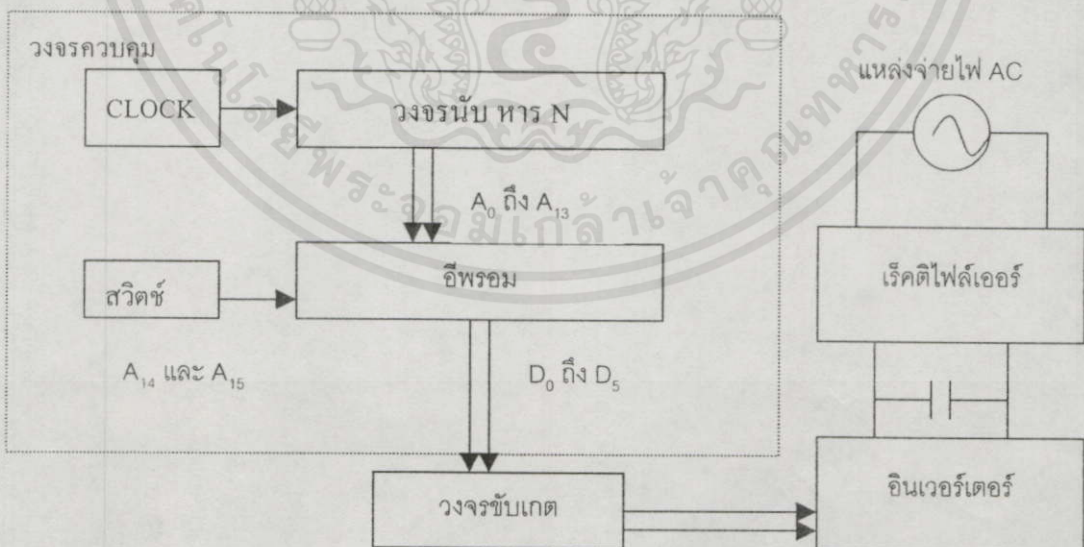
### 4.1 บทนำ

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ อุปกรณ์ควบคุมจะเป็นวงจรดิจิทัลที่สามารถนำข้อมูลจากโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบมาอัปเดตเข้า EPROM แล้วนำมาควบคุมโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องผ่านวงจรเคดไทม์ เนื่องจากโปรแกรมได้ออกแบบเคดไทม์เก็บไว้ในแพคเกจแล้ว วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ ทนแรงดันดีซีลิงค์ได้สูงสุด 400 โวลต์ กระแสไลน์สูงสุด 7 แอมป์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทดลองกับโหลดภาระขนาด ประมาณ 2 kVA ที่แรงดันดีซีลิงค์ 310 โวลต์

ในส่วนของวงจรควบคุมที่ออกแบบจะเป็นวงจรดิจิทัลที่เปลี่ยนความถี่การสวิตช์หรือค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์รวมถึง เคดไทม์ตามข้อมูลที่อยู่ในอีพรอม ซึ่งได้ข้อมูลมาจากโปรแกรมที่ออกแบบขึ้น ดังนั้นการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของรูปคลื่นจึงทำได้ง่ายและรวดเร็ว

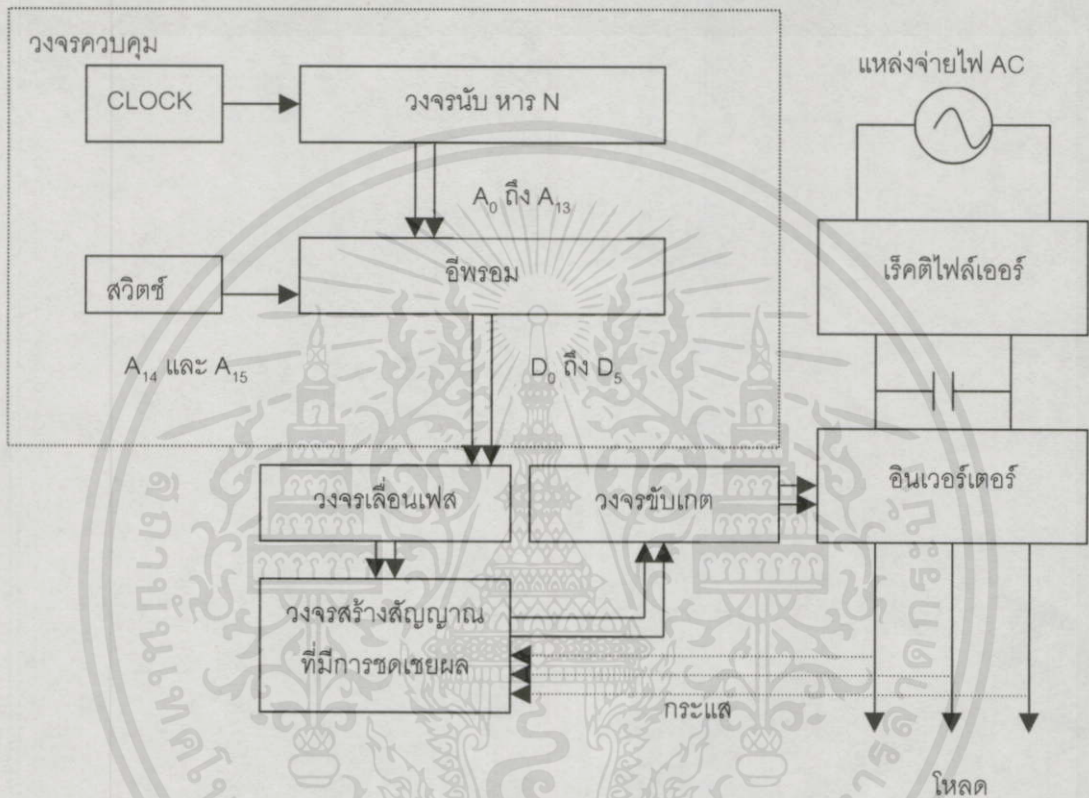
### 4.2 บล็อกไดอะแกรมและการทำงานของวงจรควบคุม

บล็อกไดอะแกรมของวงจรทดลองที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการชดเชยผลของเคดไทม์ ส่วนในรูปที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรทดลองที่มีการชดเชยผลของวงจรเคดไทม์ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์ (ไม่มีวงจรชดเชยผลเคดไทม์)

ในรูปที่ 4.1 เริ่มจากสัญญาณนาฬิกาป้อนให้กับวงจรนับทำการหารสองสัญญาณนาฬิกาให้ได้ฐานเวลาที่ต้องการ การหารสองนี้จะทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงที่สามารถนำไปซีแอดเดรส 14 บิตล่าง ( $A_0$  ถึง  $A_{13}$ ) ของอีพรอมได้ ส่วนแอดเดรสสองบิตบน ( $A_{14}$  ถึง  $A_{15}$ ) ของอีพรอมจะอ้างอิงจากสวิตช์ซึ่งทำหน้าที่เลือกชนิดของแพทเทริน โดยอีพรอม 1 ชุด มีหน่วยความจำขนาด 64 kbytes จะเก็บรูปคลื่นไว้ทั้งหมด 4 รูป เมื่อรูปคลื่นถูกอ่านอ้างอิงตามแอดเดรสดังกล่าวแล้ว จะได้สัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มออกมาทางเอาต์พุตข้อมูลของอีพรอม ซึ่งจะถูกส่งไปยังวงจรจับเกดขั้ววงจรอินเวอร์



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการชดเชยผลของเคดไทย

สำหรับวงจรที่มีการชดเชยผลของเคดไทยจะต้องอาศัยทิศทางกระแสเป็นตัวกำหนดรูปคลื่นสัญญาณ วงจรวัดกระแสจะอาศัยการวัดสัญญาณตกคร่อมตัวต้านทานขนาด  $0.1 \Omega$  ที่ต่อเข้ากับเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์และผ่านหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้น (30/220 V) จากนั้นจะต่อเข้ากับ EMI ฟิลเตอร์เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบให้ได้สัญญาณทิศทางกระแส ซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรสร้างสัญญาณที่มีการชดเชยผลการทดลองของเคดไทย สัญญาณที่จำเป็นต่อการสร้างสัญญาณที่มีการชดเชยผลของเคดไทยคือ สัญญาณแพทเทรินอุคมคิตที่อ่านจากอีพรอม และผ่านวงจรเลื่อนเฟสสองครั้ง เมื่อต่อสัญญาณจากชุดสร้างสัญญาณนี้ไปยังวงจรจับเกดแล้วจะได้สัญญาณที่นำไปขับวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไปได้

### 4.3 หลักการทำงานของวงจรถอบคุม

วงจรถอบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 จากรูป ไอซี U1 74LS04 จะทำงานร่วมกับคริสตอลสร้างสัญญาณนาฬิกาขนาด  $0.30 \mu\text{s}$  ป้อนให้กับวงจร Up/Down Counter ไอซี U2-U5 CD40193 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการนับขึ้นและรีเซตเมื่อนับครบทุกบิตแล้ว การทำงานของวงจรมันจะทำให้เกิดวงจรถอบคุม 2 ในแต่ละเอาต์พุต ทำให้สามารถนำเอาต์พุต 12 บิต จากชุดวงจรมันไปอ้างอิงแอดเดรสของอีพროม EPROM เก็บแพทเทิร์นสัญญาณ (27C512) ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้อีพโรมขนาด 64k เพื่อเก็บแพทเทิร์นขนาด 16k bytes จำนวน 4 แพทเทิร์น ต่อการอัปเดตอีพโรม 1 ครั้ง บิต A14 และ A15 ซึ่งเป็นบิตแอดเดรสบนจะต่อเข้ากับไมโครสวิทช์ เพื่อใช้อ้างอิงตำแหน่งแอดเดรส ในการเลือกชนิดของแพทเทิร์นที่เก็บไว้ได้ สัญญาณที่ได้จากอีพโรมจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของเกตอุปกรณ์สวิทช์ ซึ่ง ทั้ง 6 เกต ( $D_0$ - $D_5$ ) ซึ่งจะผ่านเข้าไอซี U6 7407 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และเข้าสู่วงจรถอบคุมต่อไป

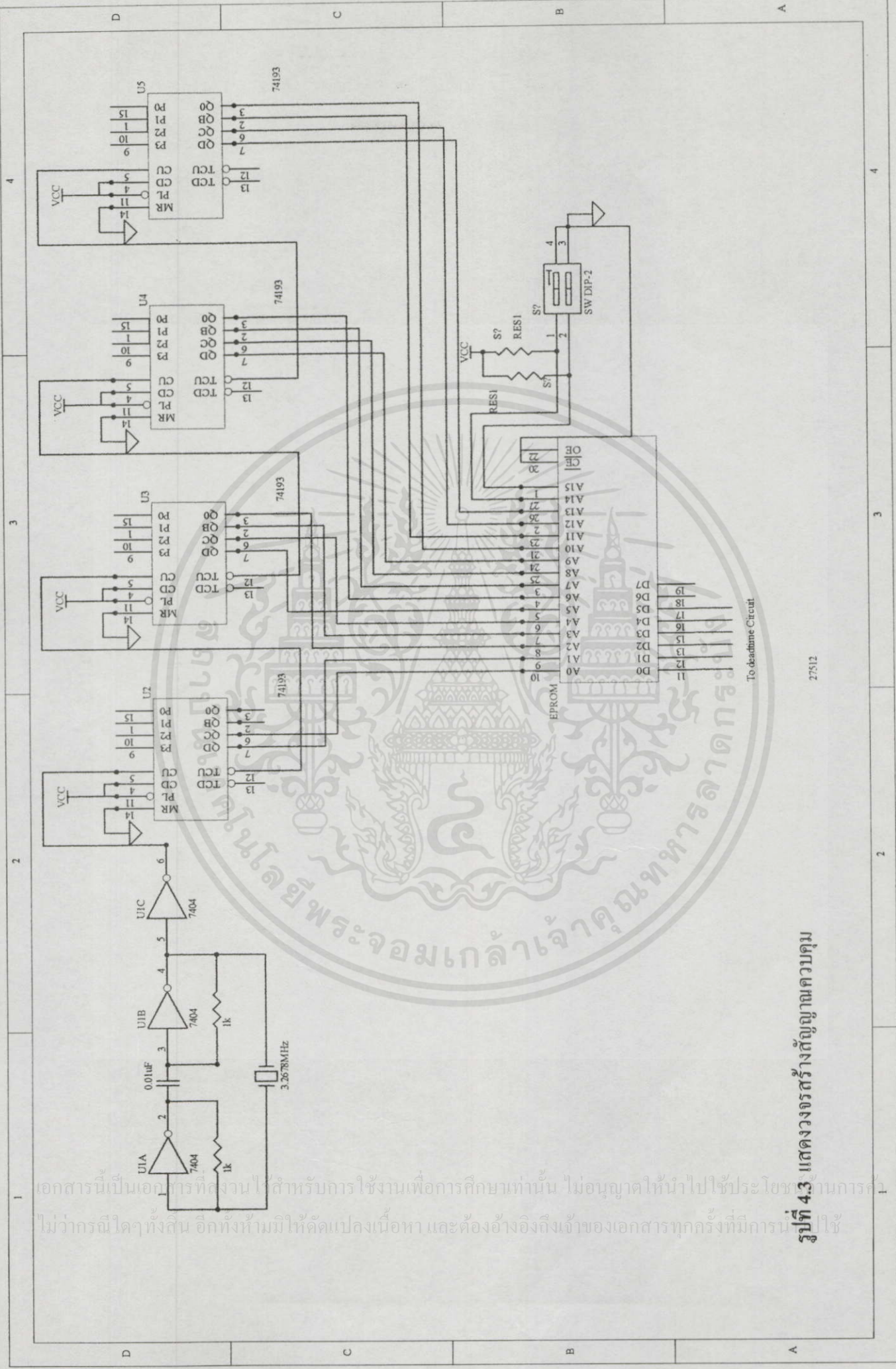
วงจรถอบคุมสัญญาณเดคไทม์แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยสัญญาณที่ได้จากบัฟเฟอร์ U6 จะถูกผ่านเข้าสู่วงจรถอบคุมที่มี R และ C ทำหน้าที่หน่วงเวลาให้สัญญาณเกิดการหน่วงเวลาออกไป จากนั้นเข้าไอซีชนิดทริกซ์ U7 4093 เพื่อให้สัญญาณคมขึ้น เมื่อนำสัญญาณที่หน่วงเวลา และผ่านชนิดทริกซ์แล้ว ไปทำโอเพอร์เรชันแอนด์สัญญาณเดิม จะได้สัญญาณที่มีเดคไทม์ตามค่า RC ที่กำหนดขึ้นในวงจรถอบคุม เดคไทม์นี้เป็นเพียงวงจรถอบคุมที่ออกแบบไว้ป้องกันกรณีที่โปรแกรมสร้างแพทเทิร์นผิดพลาดเท่านั้น จึงมีขนาดคงที่ประมาณ  $1 \mu\text{s}$  ดังนั้นการกำหนดค่าเดคไทม์ส่วนใหญ่ของวงจรถอบคุมจะขึ้นอยู่กับส่วนของโปรแกรมที่อัปเดตข้อมูลลงอีพโรม

### 4.4 วงจรขับเคลื่อน

รูปที่ 4.5 แสดงวงจรถอบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จากรูปสัญญาณที่ได้จากส่วนสร้างควบคุมจะเข้าสู่ไอซี U8 74LS07 เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และเพิ่มกระแสเอาต์พุตที่จะนำไปขับส่วนของ Opto isolate ซึ่งต้องการกระแสขับไดโอดภายในถึง 16 mA เมื่อสัญญาณผ่าน ไอซี Opto isolate U9 4N136 แล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีการแยกกราวด์ออก จึงปลอดภัยต่อวงจรถอบคุมในกรณีมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในวงจรถอบคุม

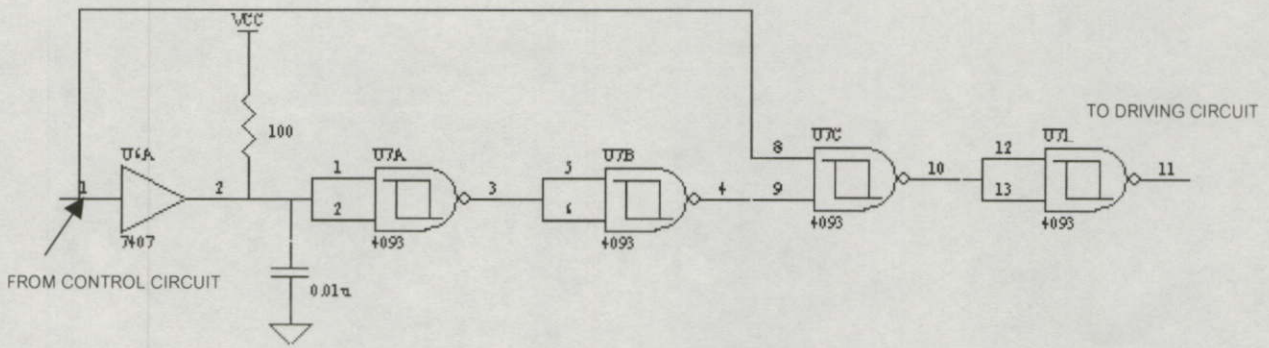
ไอซี U10 LM311 จะทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบสัญญาณ และขับทรานซิสเตอร์ T1 2N2222 เพื่อขยายกระแส แล้วนำไปขับทรานซิสเตอร์ T2 2N3053 และ T3 2N4047 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น +15 V และ -15 V ตามลำดับ สัญญาณขับเคลื่อนที่ได้จากวงจรมันจะเป็นสัญญาณที่มีระดับ +15 V และ -15 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

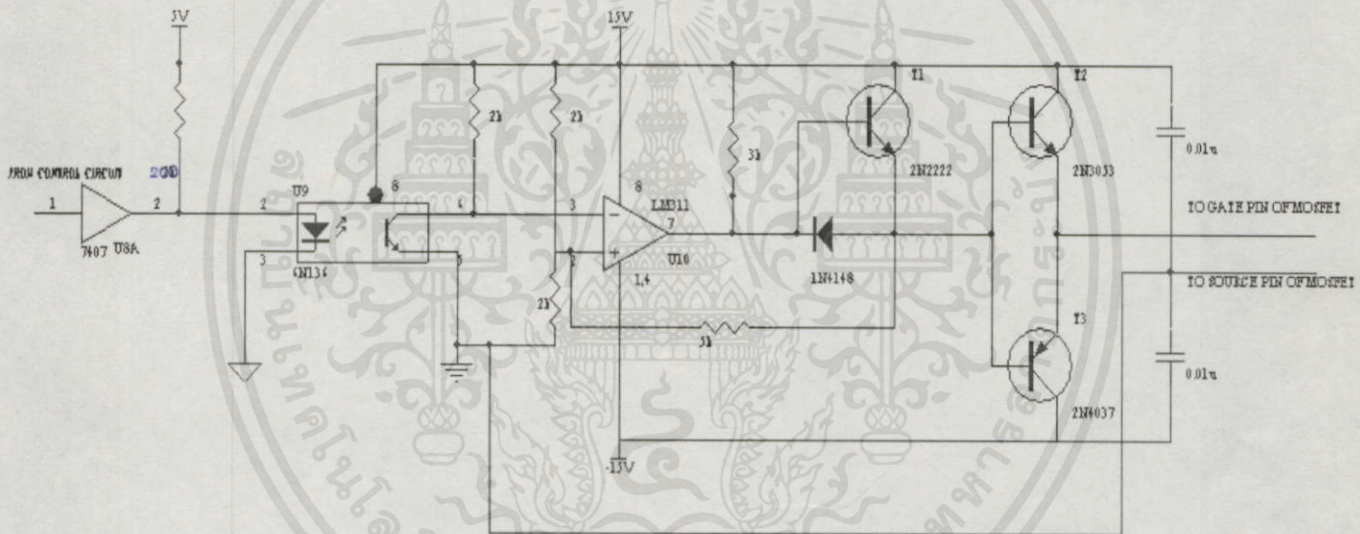


รูปที่ 4.3 แสดงวงจรสร้างสัญญาณความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำนี้ไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรสร้างเค็ดไทม์



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรขั้วเค็ด

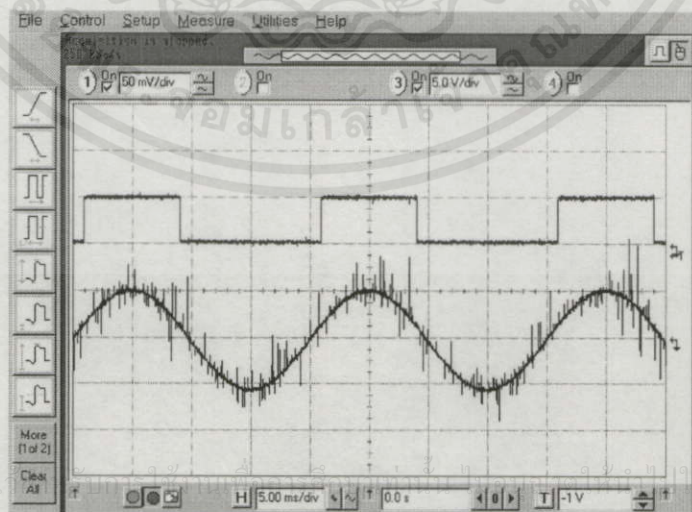
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมขดเชยผลของเดค้ไทม์

ในรูปที่ 4.7 แสดงถึงวงจรสร้างสัญญาณที่มีการชดเชยผลของเดค้ไทม์ สัญญาณที่อ่านได้จาก อีพรอมจะเหมือนกับวงจรควบคุมแบบไม่มีการชดเชยผลของเดค้ไทม์แต่จะต่างกันตรงที่สัญญาณที่อ่านได้จะต้องไปผ่านวงจร Shift Phase ที่ประกอบด้วยไอซี U1 4050 และ ไอซี U2 4049 ซึ่งจะมีค่า R และ C ทำหน้าที่หน่วงเวลาทำให้เกิดการเลื่อนเฟสเป็นค่าเท่ากับเดค้ไทม์ที่ต้องการ สัญญาณอีก ส่วนหนึ่งที่จำเป็นต่อการสร้างสัญญาณชดเชยผลเดค้ไทม์คือ ทิศทางของกระแสซึ่งรับสัญญาณมาจ วยจรตรวจับกระแสที่ใช้ตัวต้านทานขนาด  $0.5 \Omega$ , 25 W ป้อนกลับผ่านหม้อแปลง 30/220 โวลต์และ EMI ฟิลเตอร์ และเปรียบเทียบโดยใช้ไอซี U8 LM311 เพื่อให้สัญญาณที่ไปเข้าวงจรลอจิกได้ สัญญาณที่ได้จะผ่านไปยัง ไอซี U7A 4013 ซึ่งเป็น D flip-flop เพื่อเก็บค่าทิศทางกระแสการทริก จากวงจรลอจิก สัญญาณที่ได้จากการป้อนกลับกระแสจะมีลักษณะสัญญาณเป็น สี่เหลี่ยม ซึ่งจะม ิศทางตามกระแสที่ไหล ส่วนลักษณะของทิศทางสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับกับกระแสที่วัด ได้ที่ผ่านวงจรเปรียบเทียบแล้วแสดงดังรูปที่ 4.6 และวงจรชดเชยผลของเดค้ไทม์แสดงดังรูปที่ 4.7

#### 4.6 วงจรกำลัง

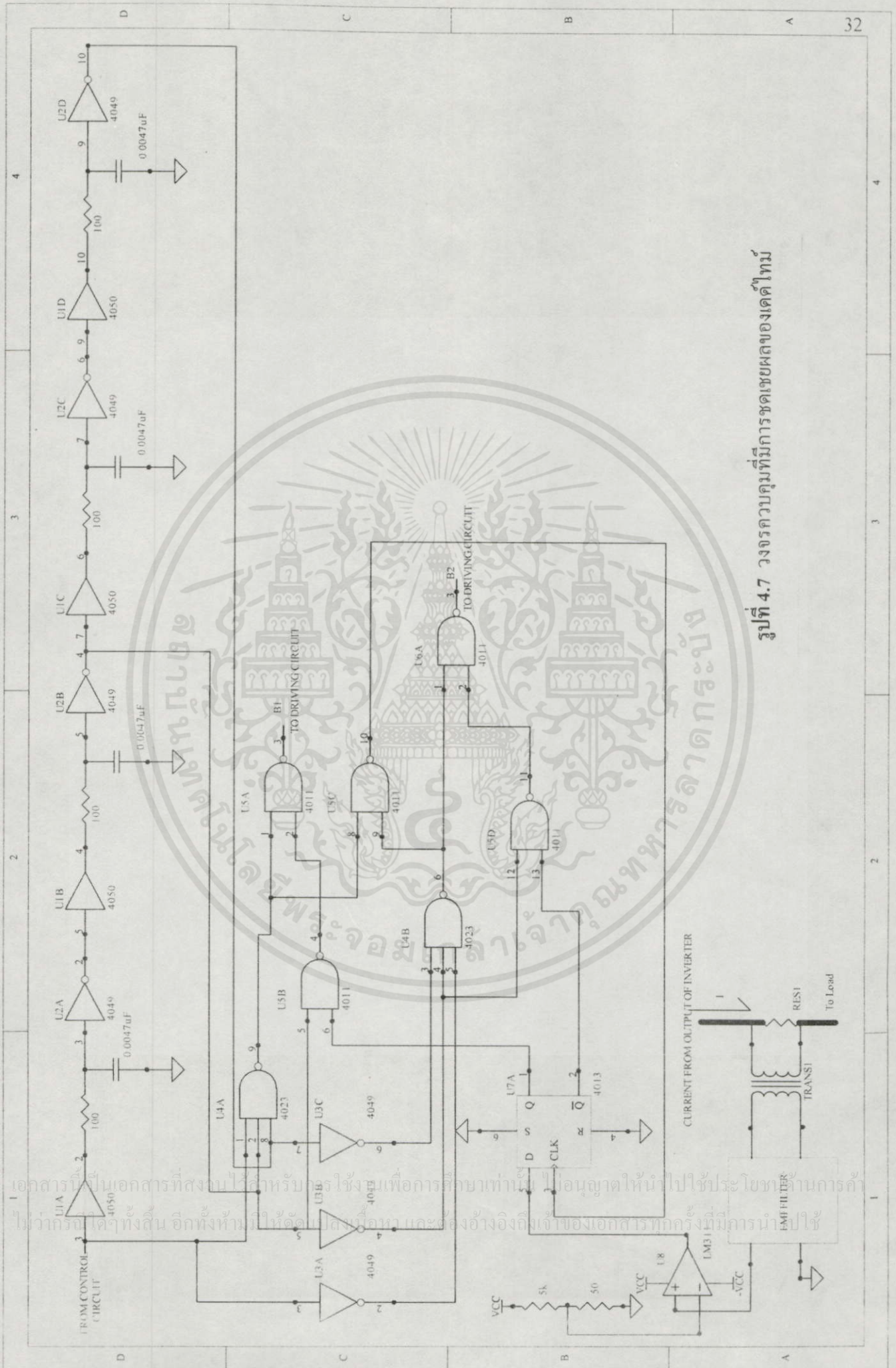
วงจรกำลังในวิทยานิพนธ์นี้ใช้มอสเฟต IRF450P ซึ่งทนแรงดันสูงสุด 500 V และ กระแส 14 แอมป์ ต่อเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มอสเฟตเบอร์นี้จะมิซีเนอร์ไดโอดอยู่ ภายใน ทำหน้าที่ในการคริลิปสัญญาณแรงดันที่เกินพิกัดได้ ส่วนบัสดีซีนี้จะต่อกับค่า C ค่า  $3300 \mu\text{F}$  450 V และ C ขนาดเล็ก  $0.1 \mu\text{F}$  630 V ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณรบกวน สำหรับภาคดีซีจะ ได้มาจากวงจรบริดจ์ ซึ่งแปลงไฟจากเอซี ไปเป็น ไฟดีซีได้ ในส่วนดีซีและเอซีนี้จะมีการติดตั้งฟิวส์ ขนาด 10 แอมป์ เพื่อป้องกันการลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อประโยชน์ด้านการค้า

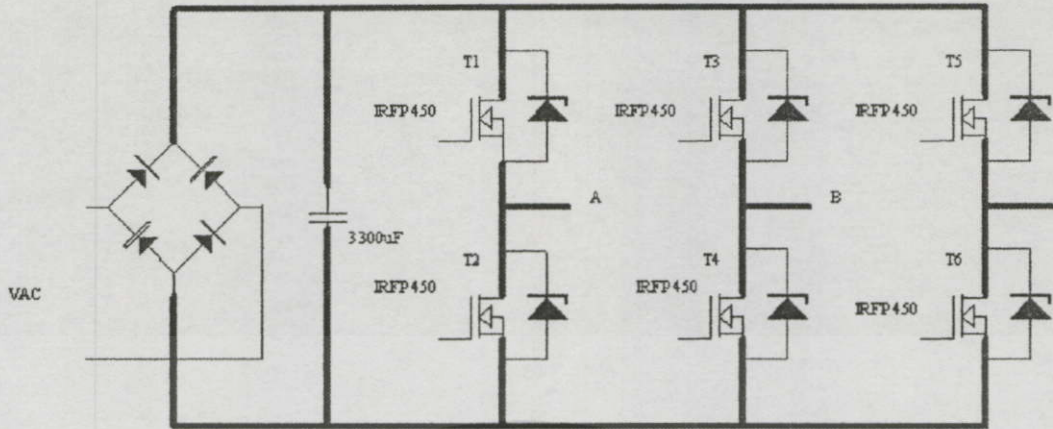
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 สัญญาณป้อนกลับทิศทางกระแส



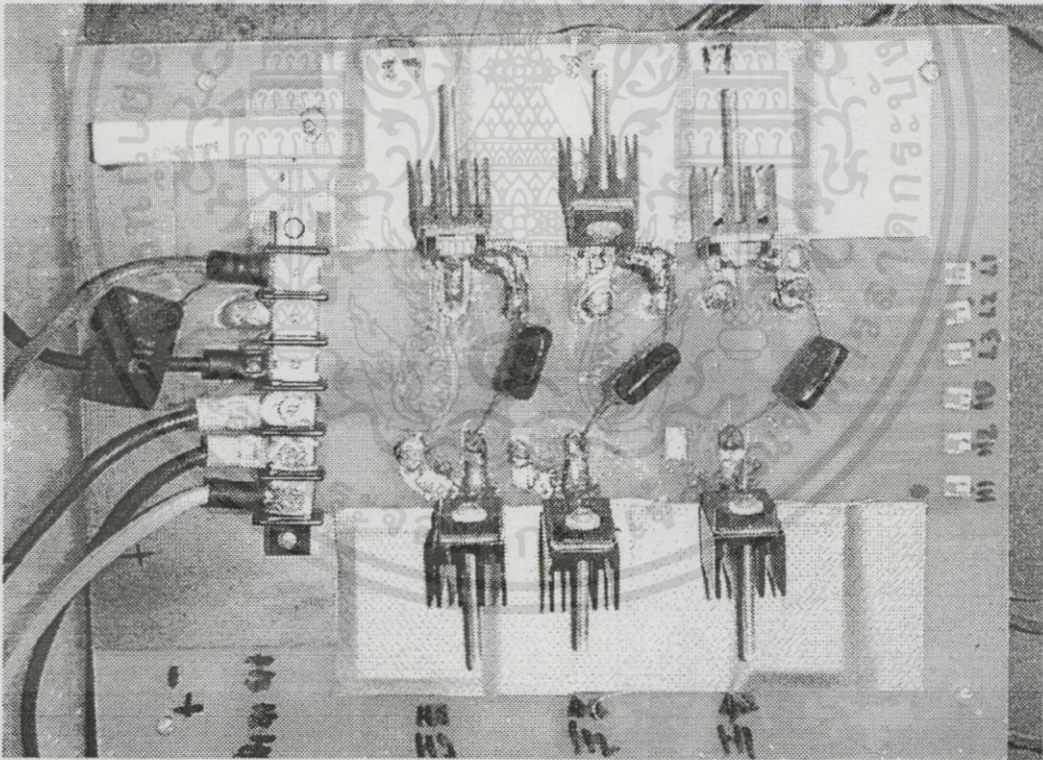
รูปที่ 4.7 วงจรควบคุมที่มีการชดเชยของเดค้ไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัปโหลดขึ้นบนเวบและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 โค้ดแอมวงจรกำลัง

รูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 แสดงรูปถ่ายวงจรที่สร้างขึ้น

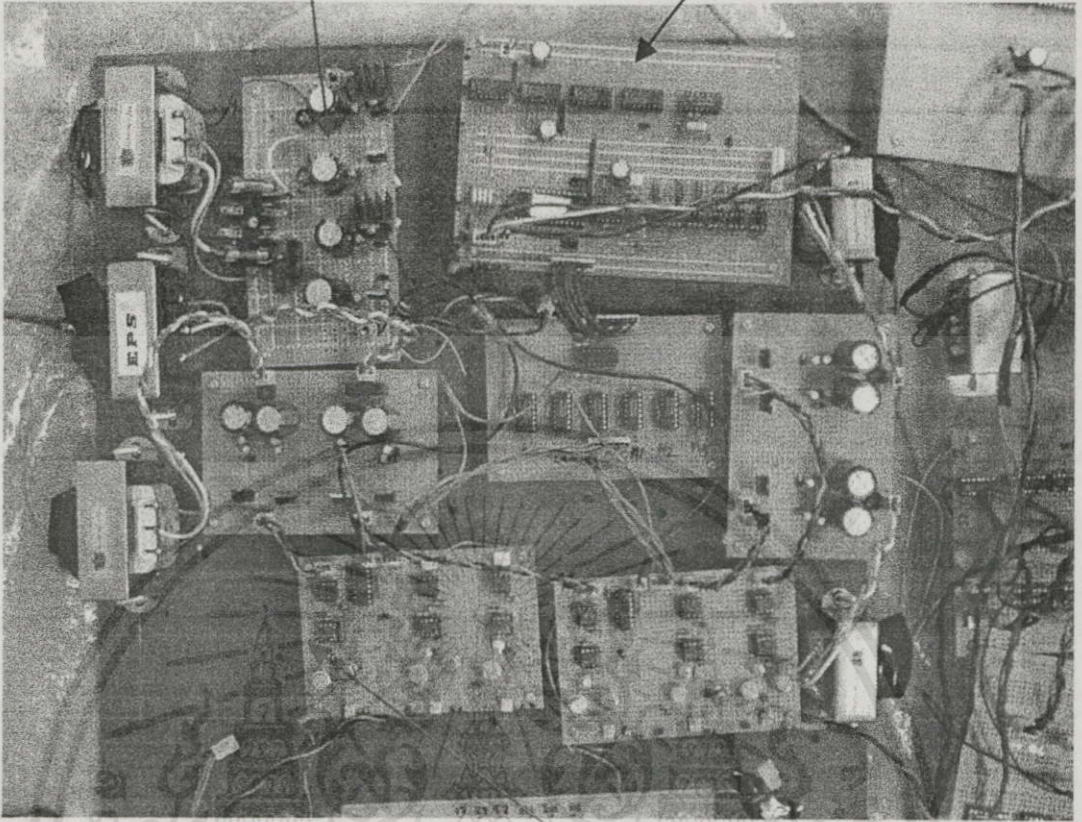


รูปที่ 4.9 วงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

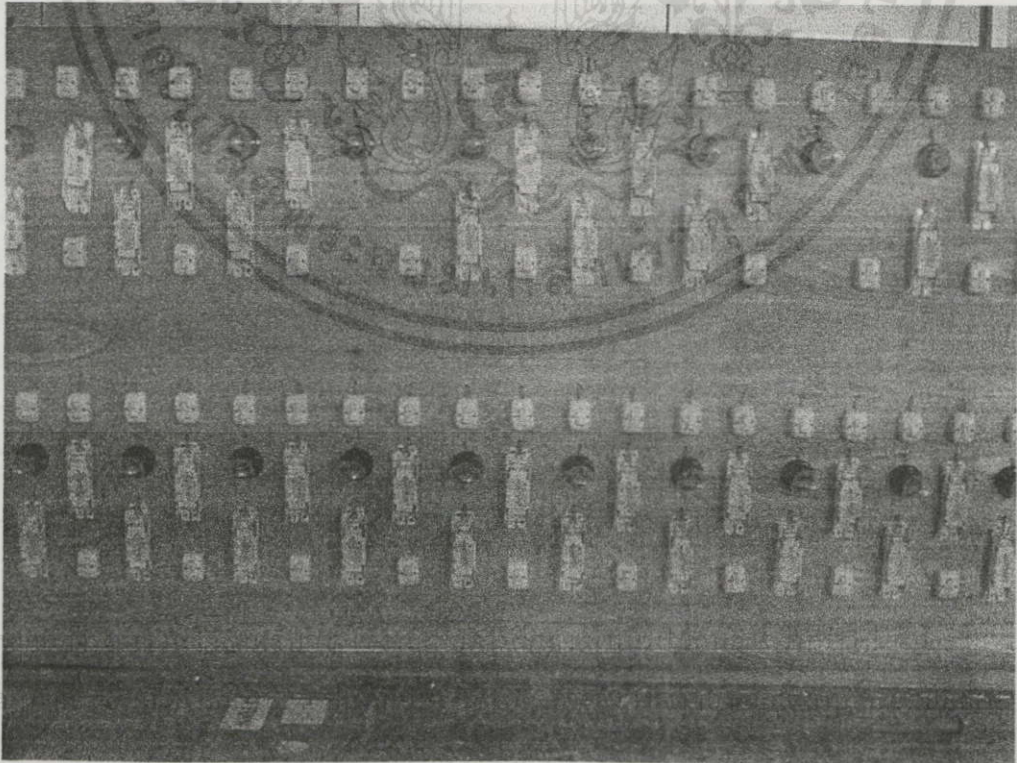
แหล่งจ่ายไฟ

วงจรถวมคุม



รูปที่ 4.10 วงจรถวมคุม

วงจรถับเกด



รูปที่ 4.11 R-L โหลดที่ต่อเข้าวงจรถับเกด

เอกสารนี้เป็น  
ไม่ว่ากรณีใด

ด้านการค้า  
ไปใช้

## ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

### 5.1 บทนำ

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการจำลองการทำงานและทดลองกับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสจริง เพื่อพิจารณาเกี่ยวกับความสามารถของโปรแกรมในการจำลองผลการทำงาน โดยได้ทำการทดลองกับสวิตชิงแพทเทิร์นทั้งหมด 5 แบบ คือ SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM แบบ 120 องศาและ GDPWM ที่มีมุมเฟสเท่ากับ 30 องศา โดยในแต่ละรูปแบบการสวิตชิงจะทำการเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ตั้งแต่ 0.2 จนถึง 1.0 โดยมีช่วงในการเปลี่ยนค่าเป็น 0.2 สำหรับการสวิตชิงแบบ SPWM และ GDPWM จะใช้ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ตั้งแต่ 0.23 จนถึง 1.15 โดยมีช่วงการเปลี่ยนค่าเป็น 0.23 เนื่องจากเทคนิคการสวิตชิงแบบ SPWM และ GDPWM ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอาร์เอ็มเอสต่ำกว่าเทคนิคแบบอื่นอยู่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ใกล้เคียงกัน (กำลังไฟฟ้าขาออกใกล้เคียงกัน) จึงต้องเพิ่มมอดูเลชันอินเด็กซ์ของเทคนิคการสวิตชิงแบบ SPWM และแบบ GDPWM เป็น 1.15 เท่า

ผลการจำลองการทำงานและผลการวัดในบทนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ในหัวข้อ 5.2 เป็นผลเกี่ยวกับ รูปคลื่นสัญญาณทั้งกระแสและแรงดันเอาต์พุต, สเปกตร้าของกระแสและแรงดันเอาต์พุต โดยแสดงผลเป็นกราฟที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.2, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ในแต่ละรูปกราฟจะนำเสนอผลการทดลองและผลจากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกันไว้ด้วย ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ใช้โหลดหลอดไฟเป็นตัวต้านทานซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามกระแสไฟฟ้า ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์จึงทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดโดยวิธี VI Method ก่อน ซึ่งได้ค่าตามตารางที่ 1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดภาระที่ต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์

แรงดัน(V)	R-L		L-L		R	
	Z( $\Omega$ )	P.F.*	Z( $\Omega$ )	P.F.*	Z( $\Omega$ )	P.F.*
43	61	0.43	100	0.19	57	1.00
86	70	0.54	104	0.19	60	1.00
132	74	0.64	118	0.19	78	1.00
176	82	0.7	120	0.19	85	1.00
220	87	0.73	120	0.19	86	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้เพื่อลงโทษและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R-L หมายถึง โหลดที่ใช้ต่ออนุกรมระหว่างหลอดไฟกับบัลลาสต์, L-L หมายถึง โหลดต่อบัลลาสต์อนุกรมกัน 2 ตัว และ R หมายถึง โหลดหลอดไฟอย่างเดียว \* หมายถึง lagging power factor

ในหัวข้อ 5.3 จะแสดงผลที่ได้จากการทดลองออกแบบวงจรชดเชยผลจากเคดีใหม่ โดยแสดงในรูปของ สเปคตรารวมถึงตารางแสดงค่าดัชนีคุณภาพ การแสดงผลในวิทยานิพนธ์นี้จะสรุปได้ การชดเชยและไม่ชดเชยและในหัวข้อที่ 5.4 จะแสดงผลสรุปคุณสมบัติและคุณภาพรูปคลื่นของการ สวิตซ์แต่ละแบบในรูปของกราฟ

## 5.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมและจากการทดลอง

ในส่วนของการแสดงผลการทดลองและการจำลองผลการทำงานจะแสดงในรูปของรูปคลื่น สัญญาณ, รูปสเปคตรารวมถึงตารางแสดงค่าดัชนีคุณภาพ การแสดงผลในวิทยานิพนธ์นี้จะสรุปได้ ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 สรุปรูปผลการทดลองและการจำลองการทำงานในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

รูปคลื่นและสเปคตรารวมถึงตารางแสดงค่าดัชนีคุณภาพ							
หัวข้อ	รูปแบบการ สวิตซ์	$m_a$	P.F.	%d.t.	รูปที่แสดงผล		
					V&I W/F	V spectra	I spectra
5.2.1	SPWM	0.92	0.70	2%	5.1(a),(b)	5.2(a),(b)	5.3(a),(b)
	SVPWM	0.80	0.70	2%	5.1(c),(d)	5.2(c),(d)	5.3(c),(d)
	HIPWM	0.80	0.70	2%	5.1(e),(f)	5.2(e),(f)	5.3(e),(f)
	DPWM120	0.80	0.70	2%	5.1(g),(h)	5.2(g),(h)	5.3(g),(h)
	GDPWM	0.80	0.70	2%	5.1(i),(j)	5.2(i),(j)	5.3(i),(j)
	SPWM	1.15	0.73	2%	5.4(a),(b)	5.5(a),(b)	5.6(a),(b)
	SVPWM	1.00	0.73	2%	5.4(c),(d)	5.5(c),(d)	5.6(c),(d)
	HIPWM	1.00	0.73	2%	5.4(e),(f)	5.5(e),(f)	5.6(e),(f)
	DPWM120	1.00	0.73	2%	5.4(g),(h)	5.5(g),(h)	5.6(g),(h)
	GDPWM	1.00	0.73	2%	5.4(i),(j)	5.5(i),(j)	5.6(i),(j)
ดัชนีคุณภาพรูปคลื่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด, มอดูเลชันอินดิเคกซ์และเปอร์เซนต์เคดีใหม่							
หัวข้อ	ตารางที่	โหลด	%d.t.	รูปกราฟ สรุปผล	รายละเอียด		
5.2.2	5.3, 5.4	R-L	2%	5.7-5.12	ค่าในตารางเหล่านี้ ได้แก่ค่า $V_{1rms}$		
	5.5, 5.6	L-L	2%	5.13-5.18	$V_{rms}$ , $THD_v$ , $DF_1$ , $DF_2$ , $I_{1rms}$ , $I_{rms}$		
	5.7, 5.8	R	2%	5.19-5.24	$THD$ , ทั้งค่าที่ได้จากการจำลองผล		

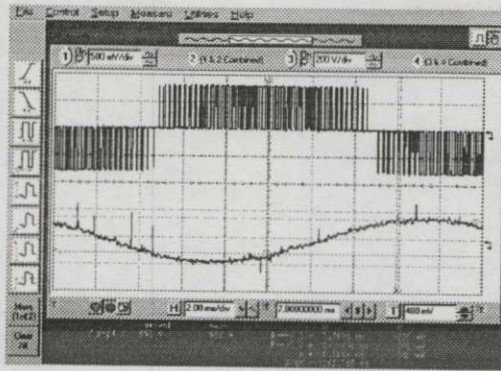
ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

	5.9, 5.10	R-L	4%	5.25-5.30	การทำงานและที่ได้จากการทดลอง โดยทดลองเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอิน เด็กซ์		
	5.11, 5.12	L-L	4%	5.21-5.36			
	5.13, 5.14	R	4%	5.37-5.42			
ผลของการลดฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำด้วยวงจรถดเซยผลเดต์ใหม่							
หัวข้อ	รูปแบบการ สวิตช์	$m_a$	P.F.	%d.t.	รูปที่แสดงผล		หมายเหตุ
					ไม่มีการชด เชยผล	มีการชดเซย ผล	
5.2.3	SPWM	0.69	0.64	2%	5.43(a)	5.43(b)	ผลที่ได้เป็น ผลจากการ ทดลอง ตาราง แสดงผลค่า ดัชนีคุณภาพ คือ ตารางที่ 5.15 และ 5.16 ส่วนรูปภาพ สรุปฮาร์มอ นิกส์ลำดับต่ำ แสดงในรูปที่ 5.45
	SVPWM	0.60	0.64	2%	5.43(c)	5.43(d)	
	HIPWM	0.60	0.64	2%	5.43(e)	5.43(f)	
	DPWM120	0.60	0.64	2%	5.43(g)	5.43(h)	
	GDPWM	0.60	0.64	2%	5.43(i)	5.43(j)	
	SPWM	0.92	0.70	2%	5.38(a)	5.44(b)	
	SVPWM	0.80	0.70	2%	5.44(c)	5.44(d)	
	HIPWM	0.80	0.70	2%	5.44(e)	5.44(f)	
	DPWM120	0.80	0.70	2%	5.44(g)	5.44(h)	
	GDPWM	0.80	0.70	2%	5.44(i)	5.44(j)	

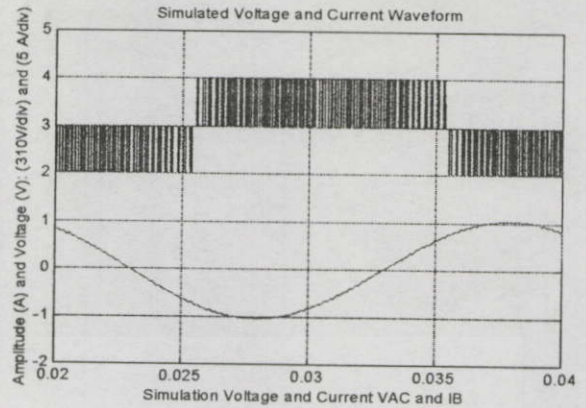
### 5.2.1 รูปคลื่นและสเปกตร้าของแรงดันและกระแสของวงจรถดเซยอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ในส่วนของการแสดงผลในรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตร้าทั้งหมดนี้ จะทดลองในเงื่อนไขของ  
ความถี่การสวิตช์ 4.05 kHz, เดคโม่ประมาณ 2 เปอร์เซนต์ของคาบความถี่การสวิตช์, โหลดที่ต่อ  
เป็นแบบ R-L ต่อแบบเดลต้า แรงดันคิซีลิงค์ที่ 310 Vdc การแสดงรูปคลื่นจะแสดงในรูปแบบของ  
รูปคลื่นแรงดัน, รูปคลื่นกระแส รวมถึงสเปกตร้าแรงดันและกระแสของรูปแบบการสวิตช์แต่ละ  
แบบ ผลที่ได้จะแสดงทั้งผลของการจำลองผลการทำงานและผลของการทดลองบนวงจรถดเซย  
อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

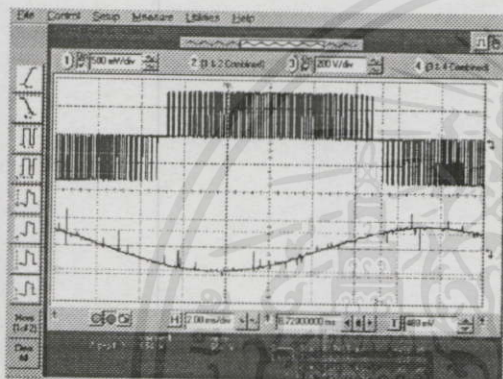
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



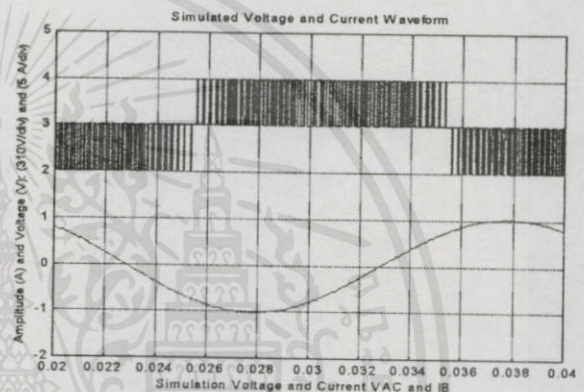
(a)



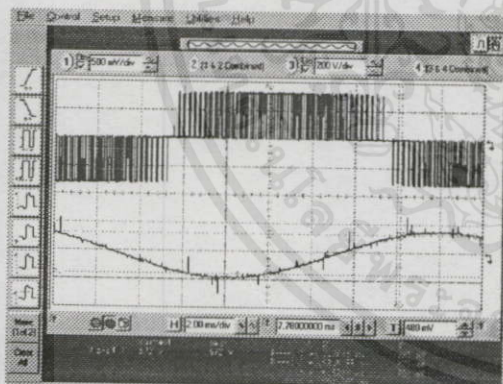
(b)



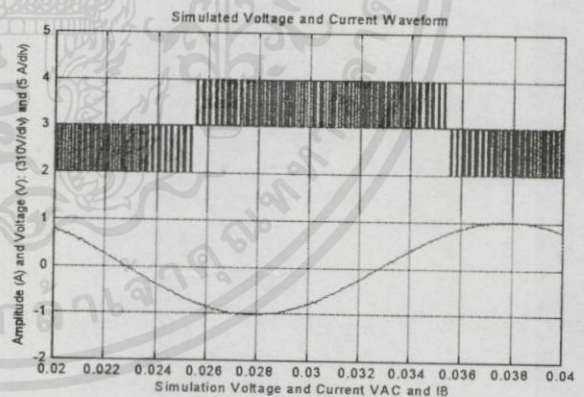
(c)



(d)



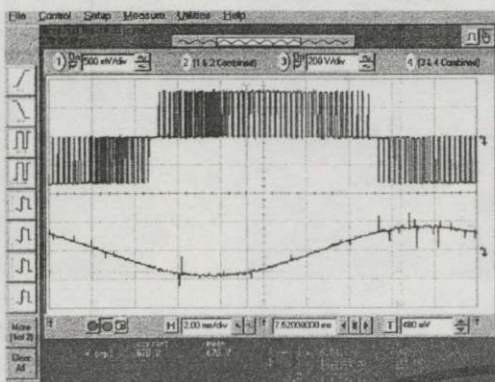
(e)



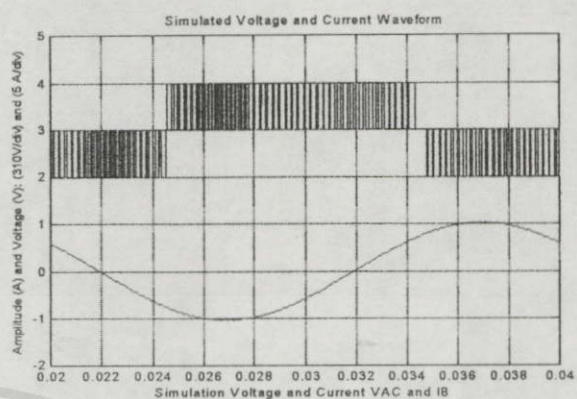
(f)

รูปที่ 5.1 แสดงผลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต  $p.f. = 0.73$  ที่  $m_a = 0.92$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 0.80$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c), (e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการ

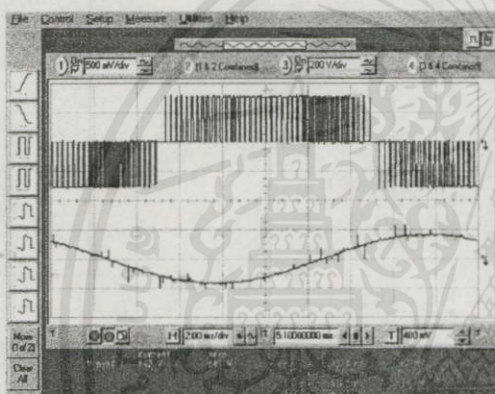
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปขายหรือเอื้อนด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 สเกลของรูปผลการทดลอง : แรงดัน คือ 200 V/ช่อง กระแส คือ 6.25 A/ช่อง  
 สเกลของรูปผลการจำลองการทำงาน : แรงดัน คือ 310 V/ช่อง กระแส คือ 5A/ช่อง



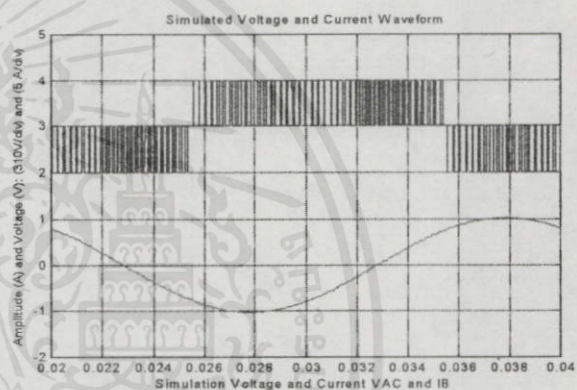
(g)



(h)



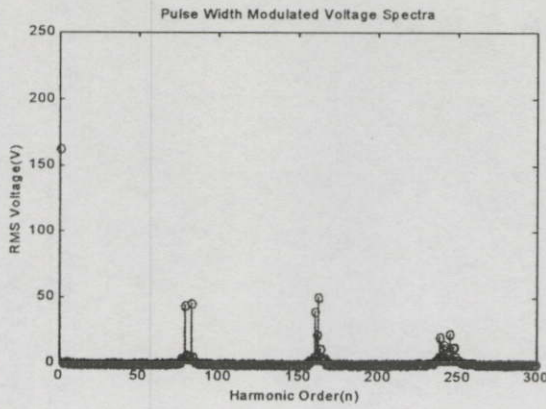
(i)



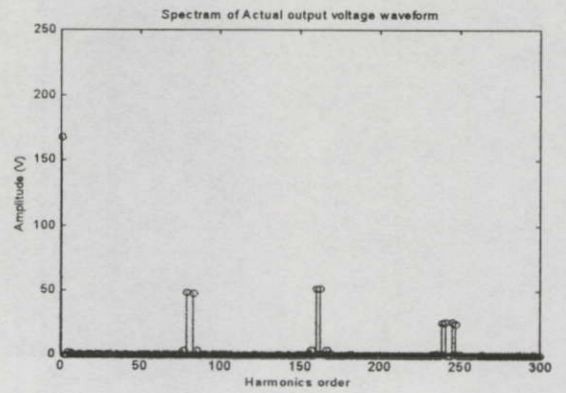
(j)

รูปที่ 5.1(ต่อ)

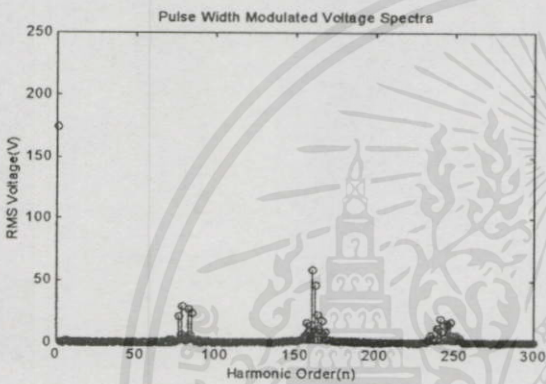
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



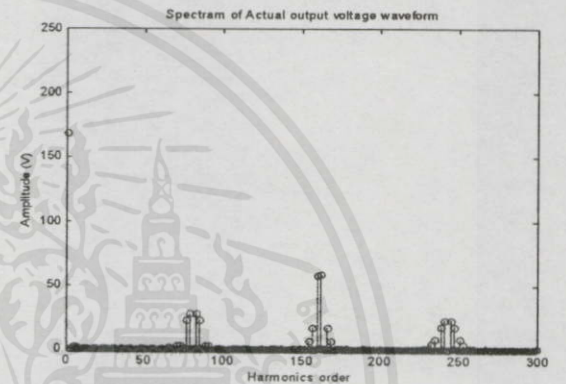
(a)



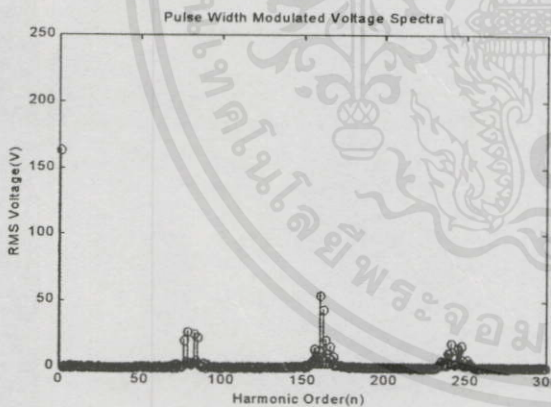
(b)



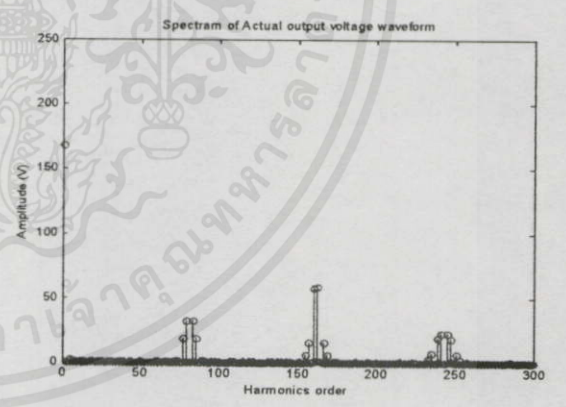
(c)



(d)

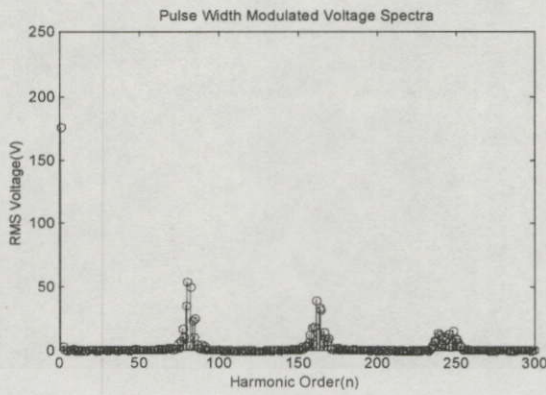


(e)

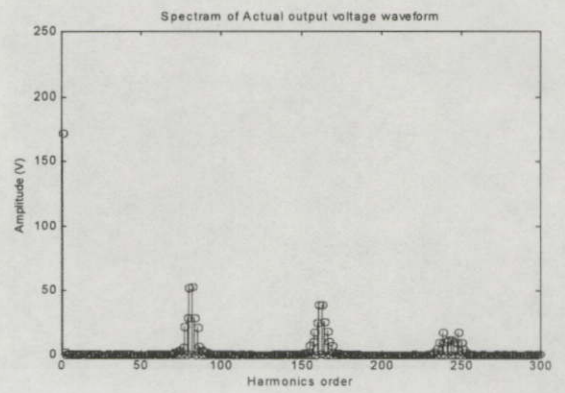


(f)

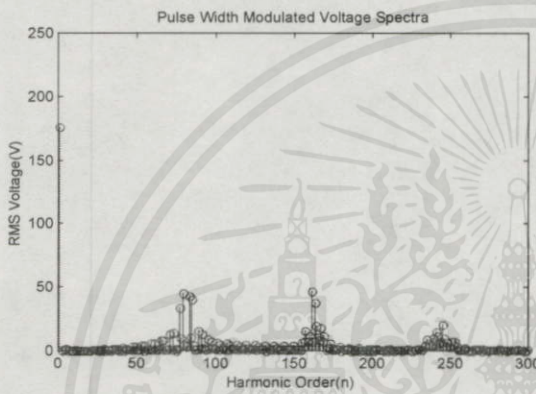
รูปที่ 5.2 แสดงผลของรูปสเปกตร้าของแรงดันเอาต์พุตที่  $p.f. = 0.73$  ที่  $m_a = 0.92$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 0.80$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c), (e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการทำงานของเทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ



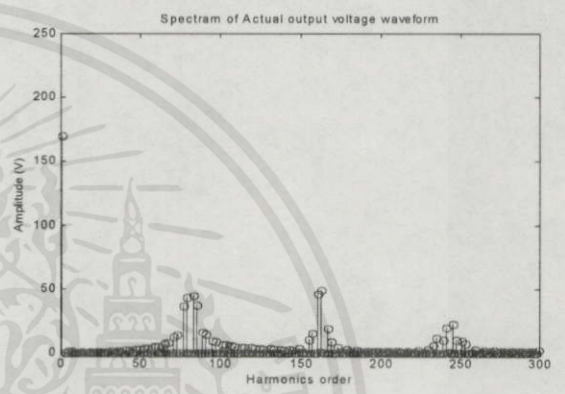
(g)



(h)



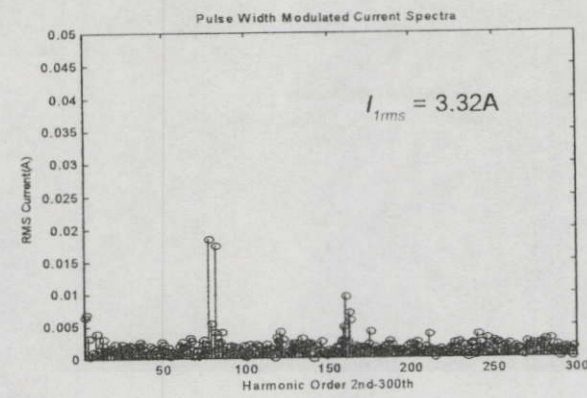
(i)



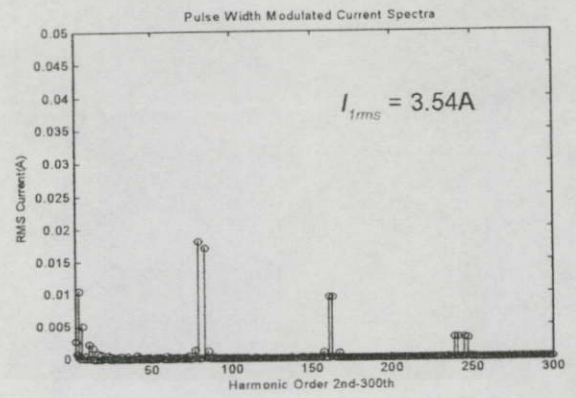
(j)

รูปที่ 5.2(ต่อ)

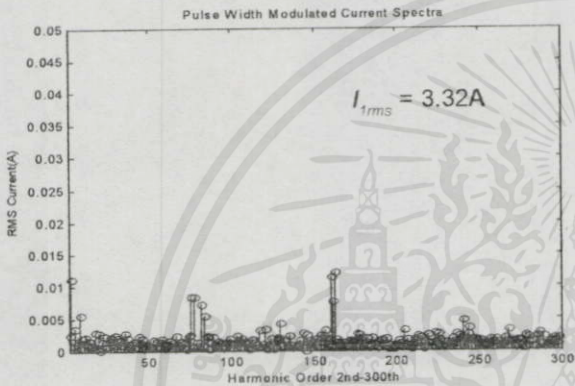
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



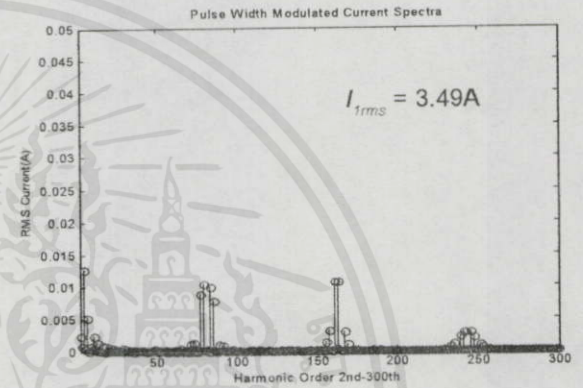
(a)



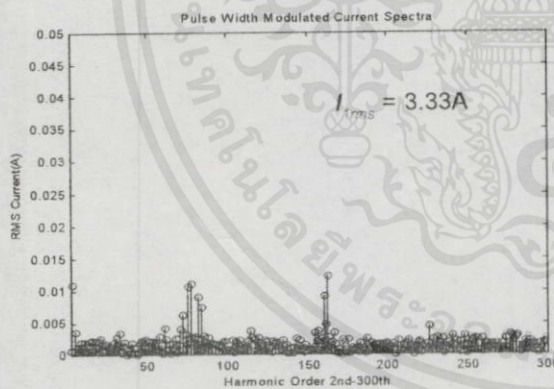
(b)



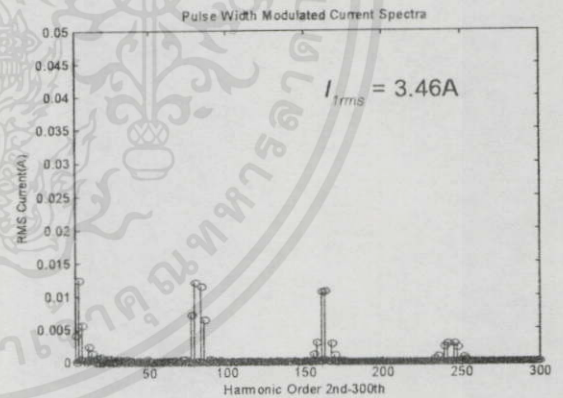
(c)



(d)



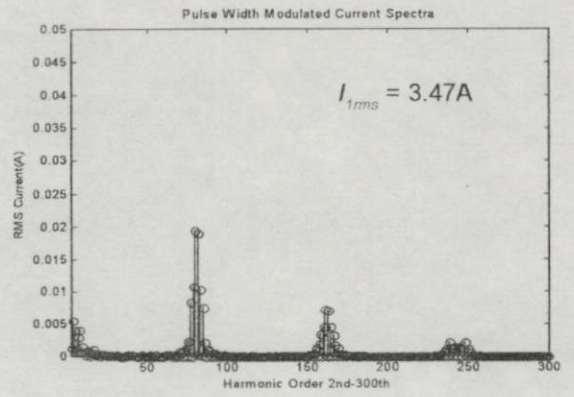
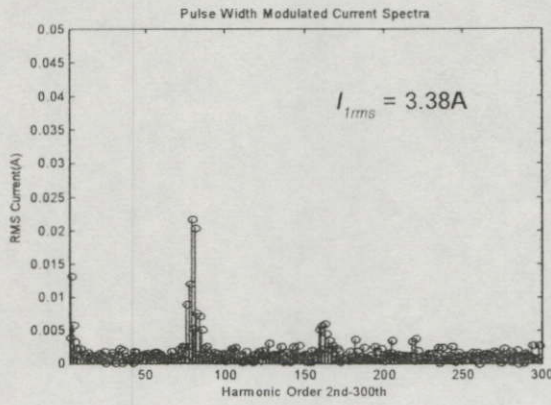
(e)



(f)

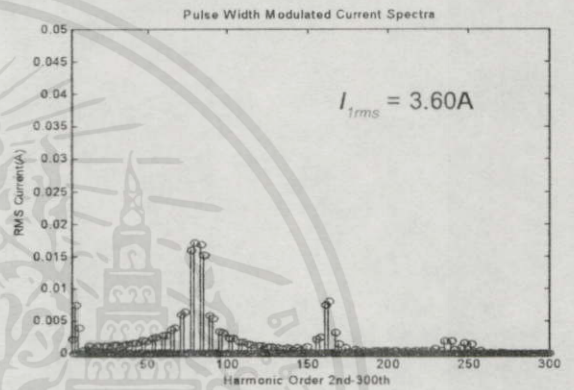
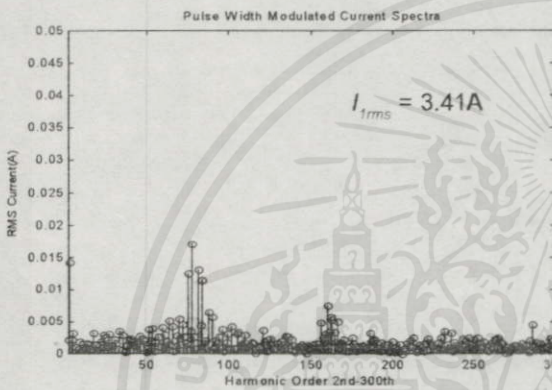
รูปที่ 5.3 แสดงผลของรูปสเปกตร้าของกระแสเอาต์พุต ที่  $p.f. = 0.73$  ที่  $m_a = 0.92$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 0.80$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c), (e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการทำงาน ของเทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์เชิงการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)

(h)

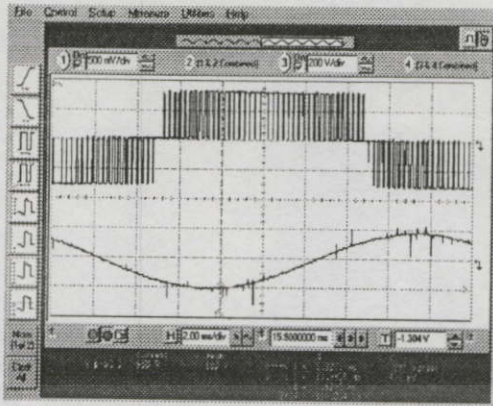


(i)

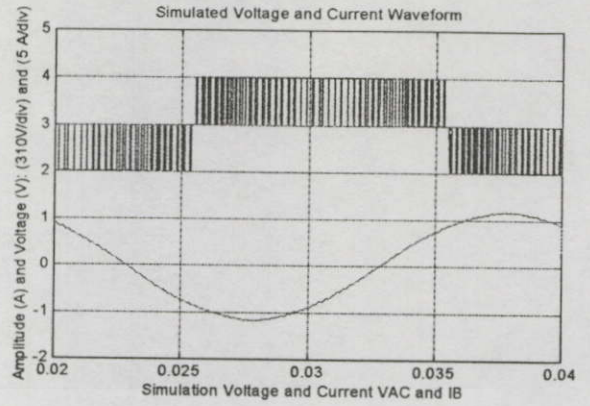
(j)

รูปที่ 5.3 (ต่อ)

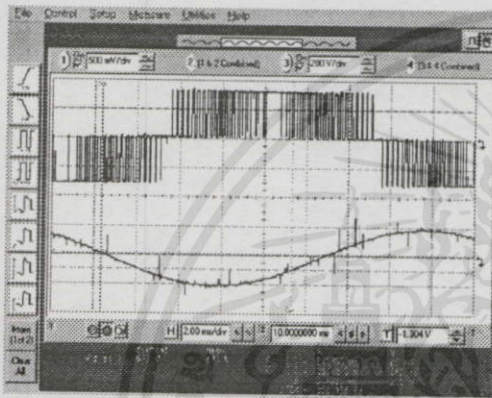
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



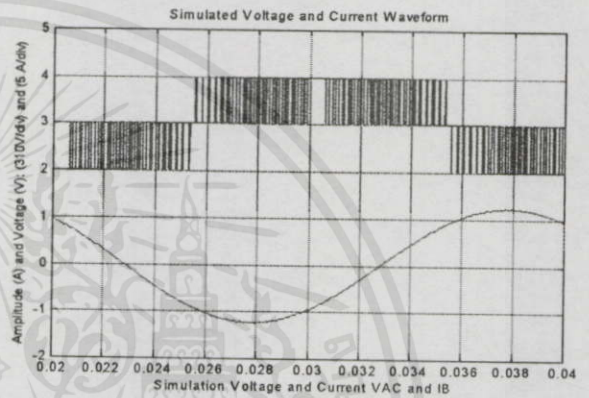
(a)



(b)



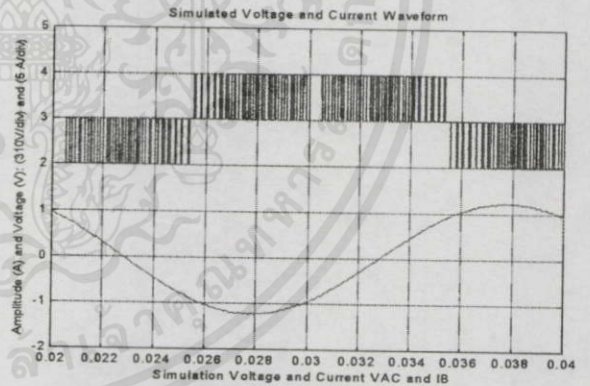
(c)



(d)



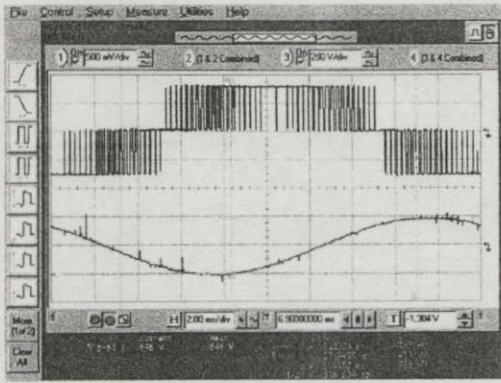
(e)



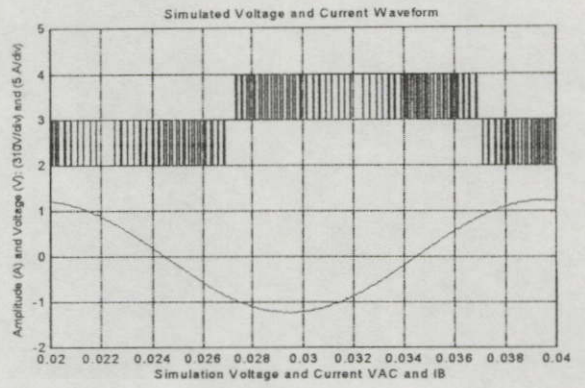
(f)

รูปที่ 5.4 แสดงผลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต  $p.f. = 0.70$  ที่  $m_a = 1.15$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 1.0$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c), (e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการทำงานของเทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ

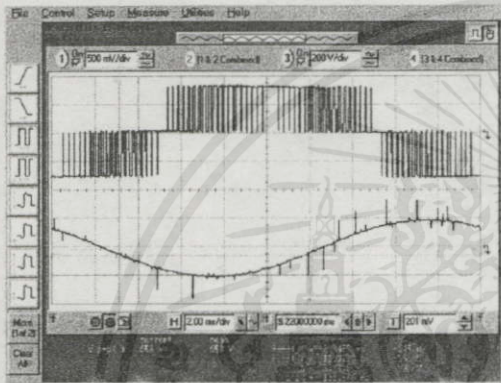
สเกลของรูปผลการทดลอง : แรงดัน คือ 200 V/ช่อง กระแส คือ 6.25 A/ช่อง สเกลของรูปผลการจำลองการทำงาน : แรงดัน คือ 310 V/ช่อง กระแส คือ 5A/ช่อง



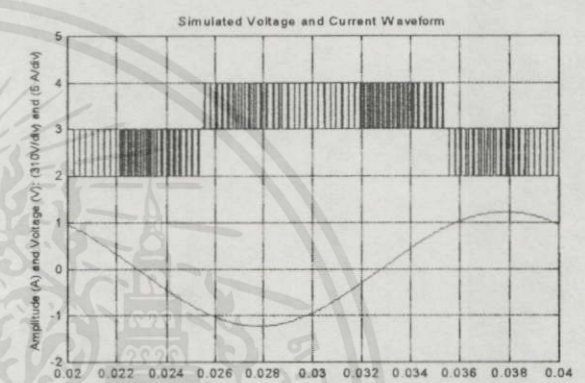
(g)



(h)



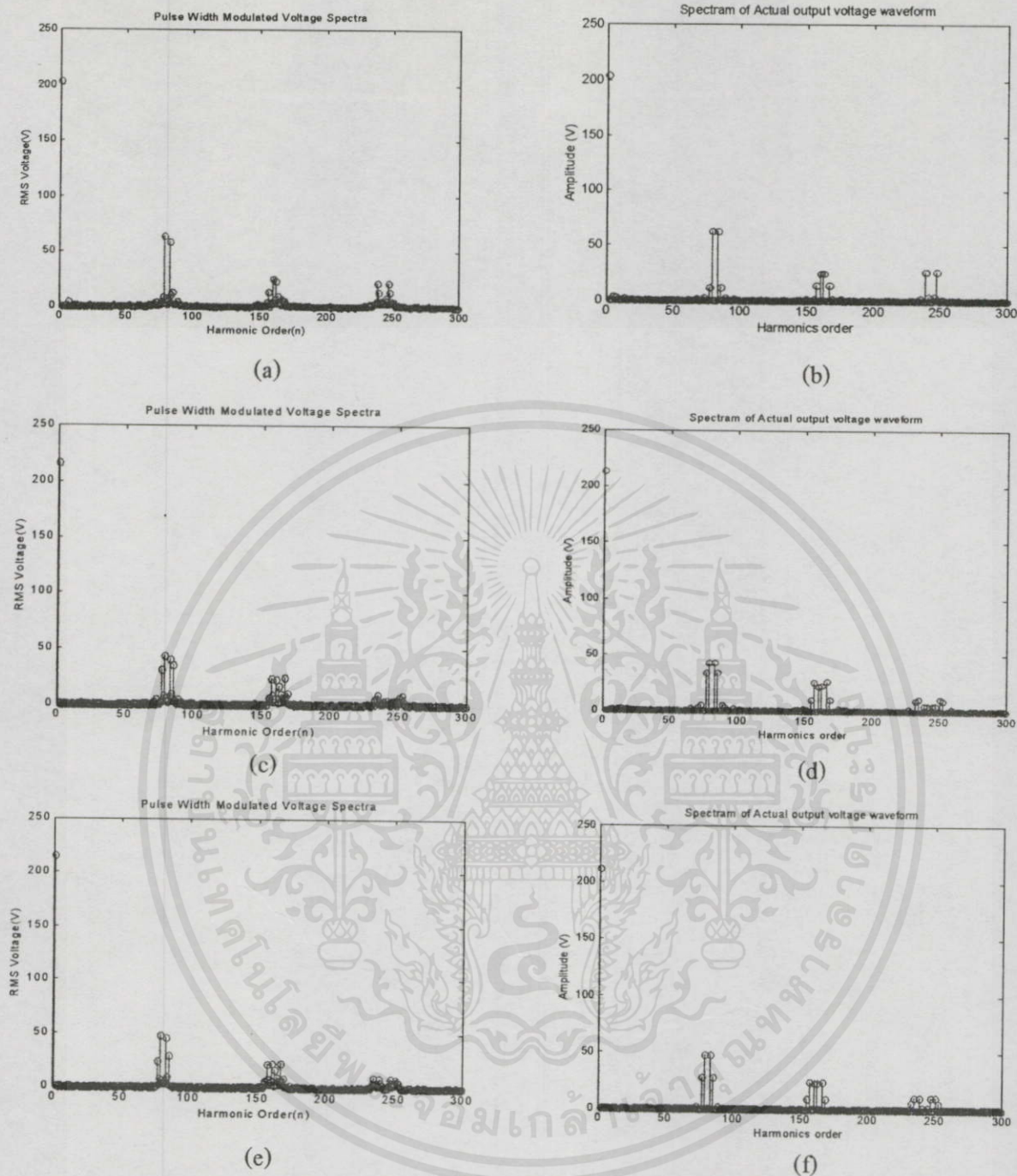
(i)



(j)

รูปที่ 5.4(ต่อ)

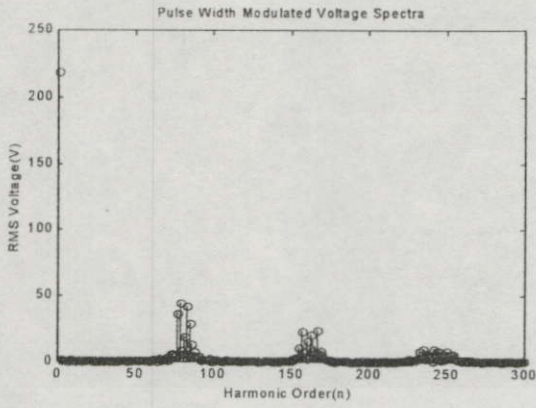
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



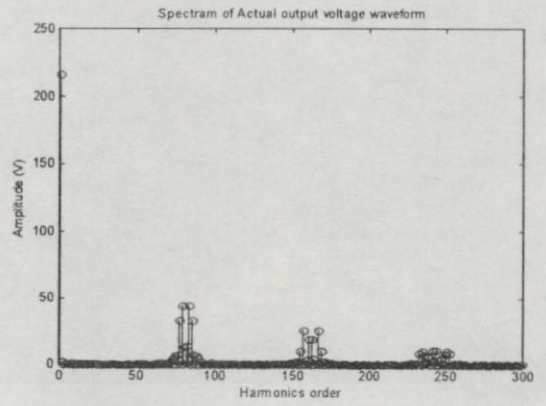
รูปที่ 5.5 แสดงผลของรูปสเปกตร้าของแรงดันเอาต์พุตที่  $p.f. = 0.70$  ที่  $m_a = 1.15$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 1.0$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c), (e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการทำงาน

ของเทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ

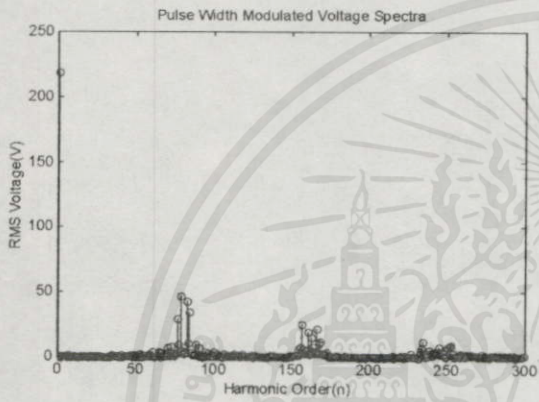
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



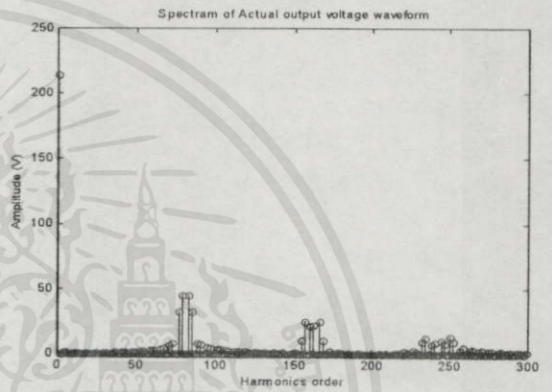
(g)



(h)



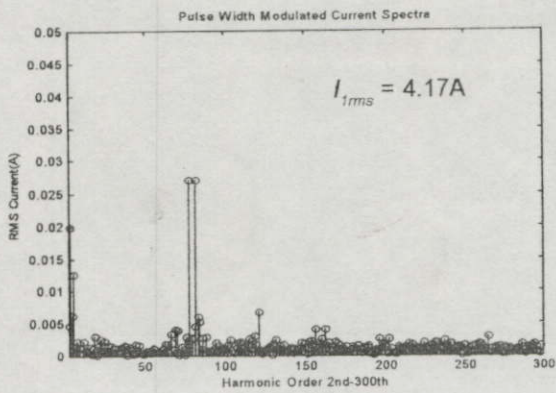
(i)



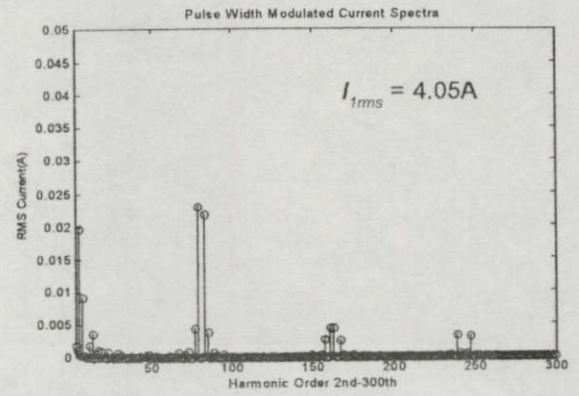
(j)

รูปที่ 5.5(ต่อ)

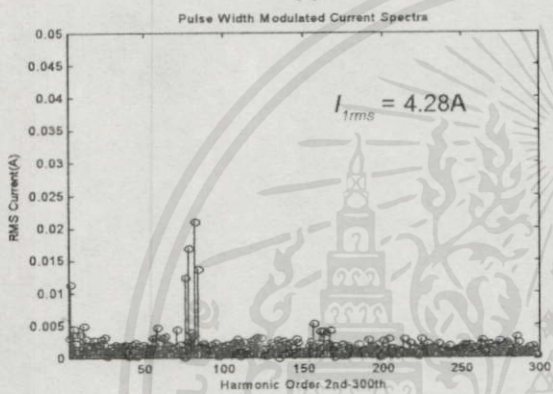
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



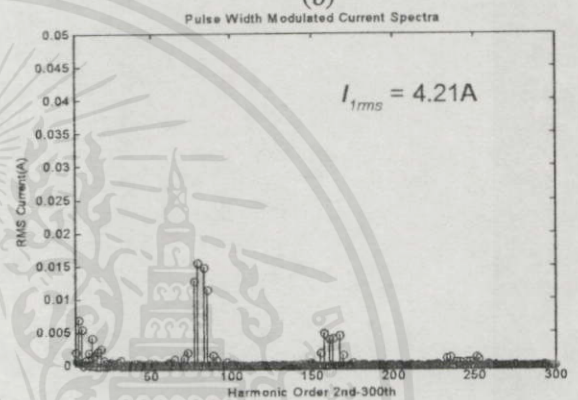
(a)



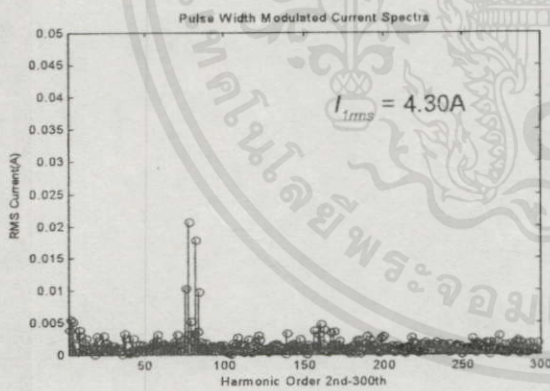
(b)



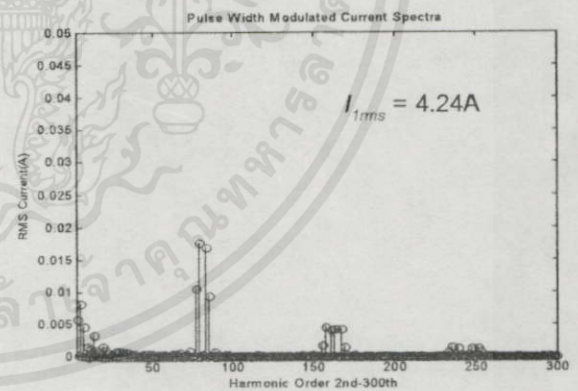
(c)



(d)



(e)



(f)

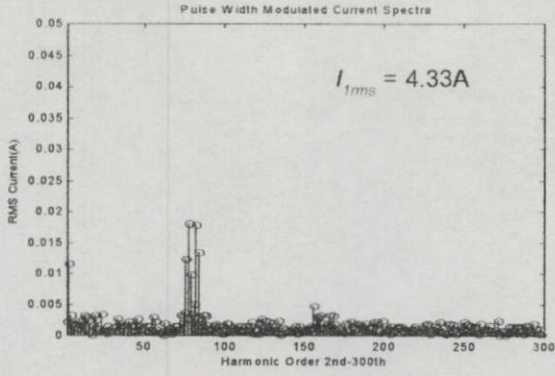
รูปที่ 5.6 แสดงผลของรูปสเปคตร้าของกระแสเอาต์พุตที่  $p.f. = 0.70$  ที่  $m_a = 1.15$  สำหรับรูปคลื่นแบบ SPWM และ GDPWM, และ  $m_a = 1.0$  สำหรับรูปคลื่นแบบอื่น รูป (a),(c),

(e),(g) และ (i) เป็นผลการทดลองของรูปคลื่น เทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM,

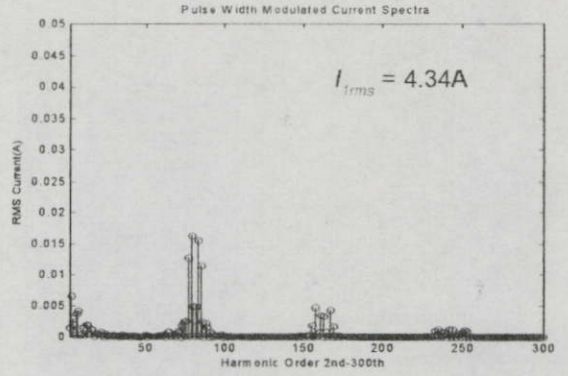
DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ,รูป (b),(d),(f),(h)และ(j) เป็นผลจากการจำลองการ

ทำงานของเทคนิค SPWM, SVPWM, HIPWM, DPWM120 และ GDPWM ตามลำดับ

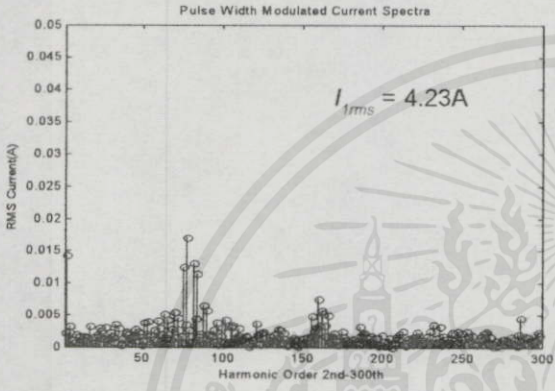
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่ากรณีใดๆทั้งนี้



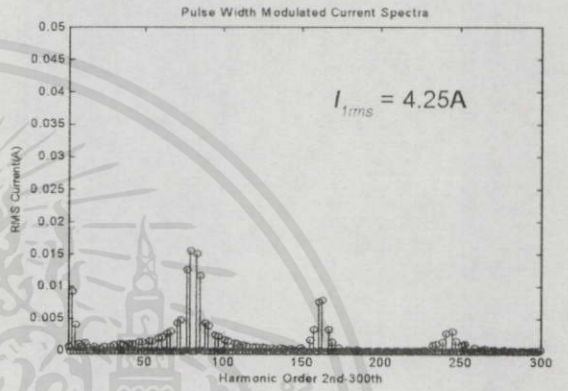
(g)



(h)



(i)



(j)

รูปที่ 5.3(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 ตารางแสดงค่าดัชนีคุณภาพของรูปคลื่นสัญญาณ

ค่าดัชนีคุณภาพจะทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.1 โดยจะเปลี่ยนค่าเดดไทม์เป็นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และ 4 เปอร์เซ็นต์ของคาบความถี่การสวิตช์, โหลดที่ต่อเป็นแบบ R-L, L-L และ R ต่อแบบเดดไทม์ โดยจะแสดงผลทั้งผลจากการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นทั้งหมดจะคิดจากฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ถึงฮาร์โมนิกส์ที่ 300

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับความถี่และอินเด็กซ์ เดดไทม์ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการเป็น R-L

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต										
	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$THD_v$	$THD_v^*$	$DF_1$	$DF_1^*$	$DF_2$	$DF_2^*$	
SPWM	0.23	40.9	40.6	71.4	69.4	137.7	134.7	1.00	1.39	0.12	0.23
	0.46	83.8	82.5	132.9	126.0	123.0	120.6	0.86	0.94	0.11	0.11
	0.69	127.3	125	176.8	174.0	101.8	85.6	0.75	0.76	0.12	0.09
	0.92	172.6	168.0	214.3	208.0	73.6	60.1	0.65	0.64	0.10	0.06
	1.15	202.2	204.0	215.8	229.8	51.2	48.4	0.84	0.68	0.09	0.07
HIPWM	0.2	41.4	40.6	70.4	69.3	136.8	134.6	1.16	1.32	0.28	0.19
	0.4	83.8	82.5	131.8	115.5	121.2	115.2	0.85	0.96	0.10	0.11
	0.6	127.9	124.9	176.8	173.4	101.6	87.0	0.70	0.73	0.10	0.08
	0.8	174.1	167.0	215	200.4	74.1	59.7	0.57	0.59	0.09	0.06
	1.0	215.6	212.0	236.1	232.8	48.8	43.3	0.52	0.52	0.07	0.03
SVPWM	0.2	41.4	40.6	70.4	69.3	136.8	134.6	1.1	1.36	0.22	0.19
	0.4	84.1	83.1	132.1	130.9	120.8	116.2	0.86	0.92	0.13	0.11
	0.6	127.7	122.8	176.7	173.9	101.7	88.1	0.76	0.73	0.13	0.08
	0.8	172.0	168.4	214.9	200.7	74.8	59.8	0.59	0.58	0.10	0.06
	1.0	216.0	213.0	236.5	232.5	49.0	43.7	0.52	0.50	0.06	0.05
DPWM120	0.2	42.6	42.0	93.1	91.9	193.6	175.5	3.77	4.51	2.13	2.03
	0.4	86.4	85.9	142.5	140.8	130.9	124.5	2.43	2.37	0.96	0.93
	0.6	131.1	128.7	183.1	179.2	102.6	91.7	1.50	1.53	0.53	0.55
	0.8	176.2	171.7	211	211.0	74.5	67.7	1.14	1.07	0.43	0.33
	1.0	218.6	217.0	240.7	238.0	49.7	43.9	0.69	0.73	0.23	0.27
GDPWM	0.2	41.8	40.3	97.9	89.2	195.5	177.0	2.00	2.02	0.24	0.16
	0.4	86.5	83.4	150.1	138.0	141.8	126.0	1.50	1.49	0.14	0.08
	0.6	131.0	127.0	188.1	178.2	102.9	92.0	1.16	1.09	0.13	0.05
	0.8	175.8	170.4	219.1	209.9	74.2	68.2	0.76	0.74	0.09	0.04
	1.0	219.1	213.8	244.6	232.0	49.7	44.2	0.53	0.52	0.06	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

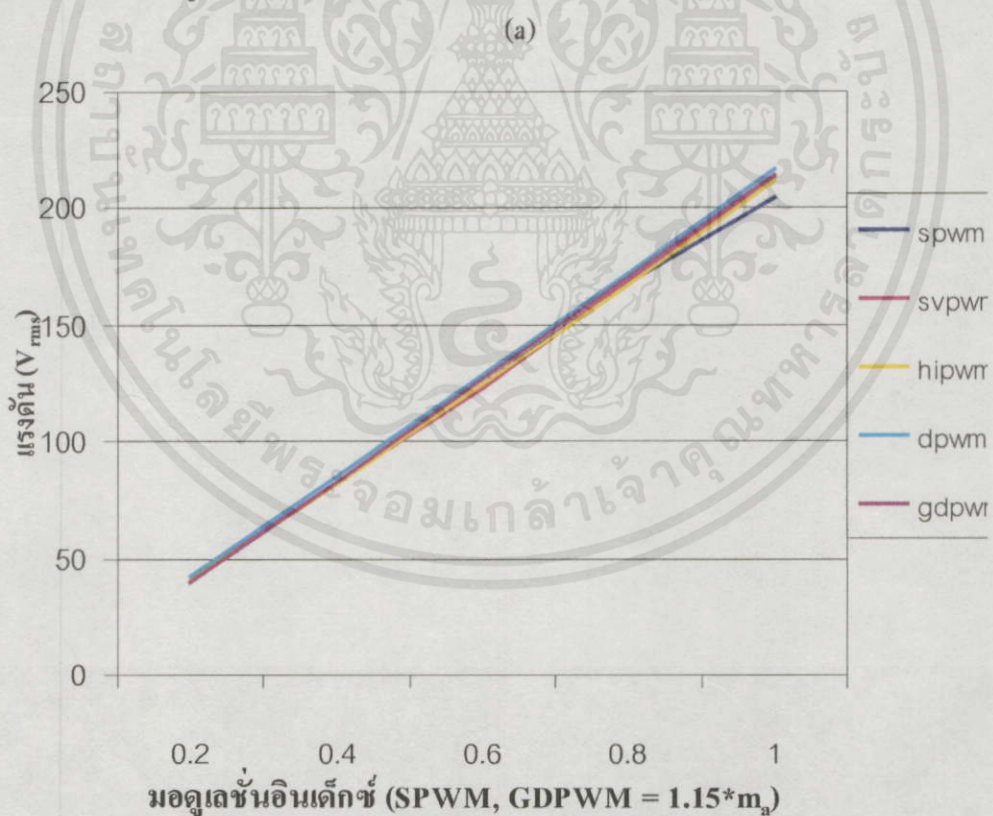
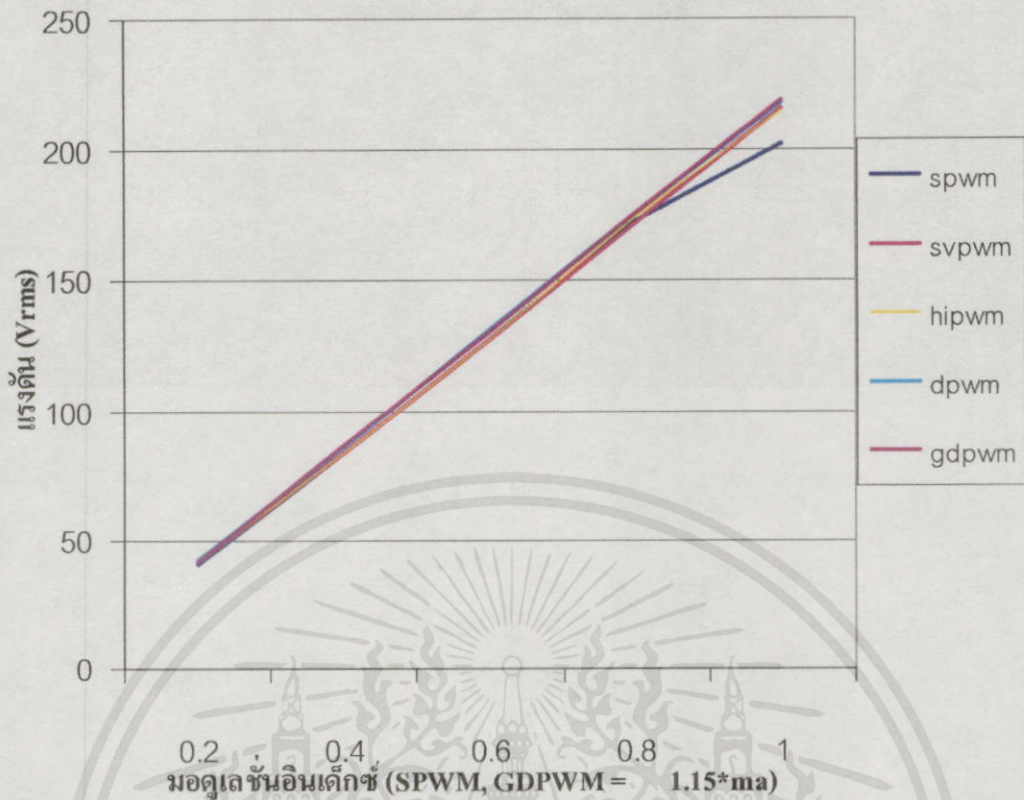
(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน  $V_{I_{rms}}$  และ  $V_{rms}$  มีหน่วยเป็น V,  $THD_v$ ,  $DF_1$ ,  $DF_2$  มีหน่วยเป็น %)

ตารางที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ เดคั้ใหม่ประมาณ 2%ของความถี่การสวิตซ์ ที่โหลดภาระเป็น R-L

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาต์พุต					
	$I_{I_{rms}}$	$I_{I_{rms}}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$
SPWM 0.23	1.11	1.15	1.11	1.15	2.08	1.57
	0.46	2.06	2.03	2.06	2.03	1.49
	0.69	2.75	2.84	2.76	2.85	1.43
	0.92	3.32	3.54	3.32	3.54	1.39
	1.15	4.17	4.05	4.17	4.05	1.37
HIPWM	0.2	1.12	1.14	1.12	1.15	2.14
	0.4	2.09	2.05	2.09	2.03	1.43
	0.6	2.75	2.86	2.76	2.72	1.38
	0.8	3.33	3.46	3.33	3.46	1.33
	1.0	4.30	4.24	4.30	4.21	1.21
SVPWM	0.2	1.11	1.15	1.11	1.14	2.10
	0.4	2.06	2.03	2.06	2.05	1.44
	0.6	2.74	2.72	2.74	2.87	1.50
	0.8	3.32	3.49	3.33	3.47	1.30
	1.0	4.28	4.21	4.28	4.24	1.07
DPWM120	0.2	1.16	1.19	1.16	1.20	4.60
	0.4	2.13	2.11	2.13	2.11	2.78
	0.6	2.79	2.93	2.79	2.93	2.12
	0.8	3.38	3.47	3.38	3.47	1.67
	1.0	4.33	4.34	4.33	4.34	1.25
GDPWM	0.2	1.08	1.15	1.08	1.15	3.14
	0.4	1.97	2.06	1.97	2.06	2.11
	0.6	2.75	2.89	2.75	2.89	1.69
	0.8	3.41	3.6	3.41	3.60	1.39
	1.0	4.13	4.25	4.13	4.25	0.90

(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน  $I_{I_{rms}}$ ,  $I_{rms}$  มีหน่วยเป็น A,  $THD_i$  มีหน่วยเป็น %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

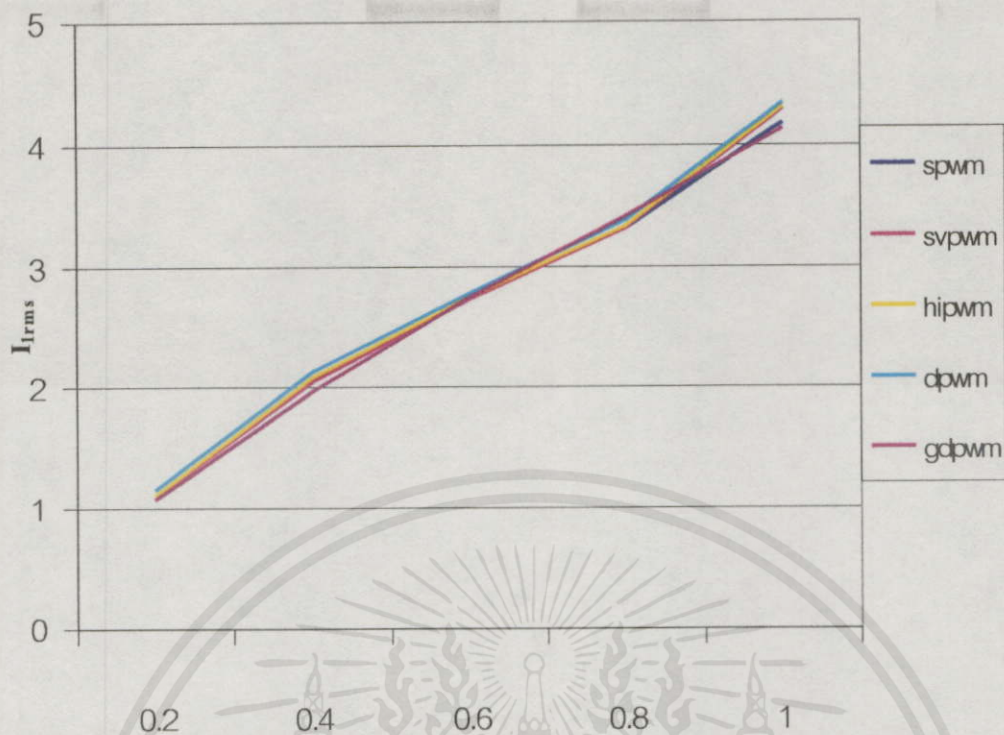


(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

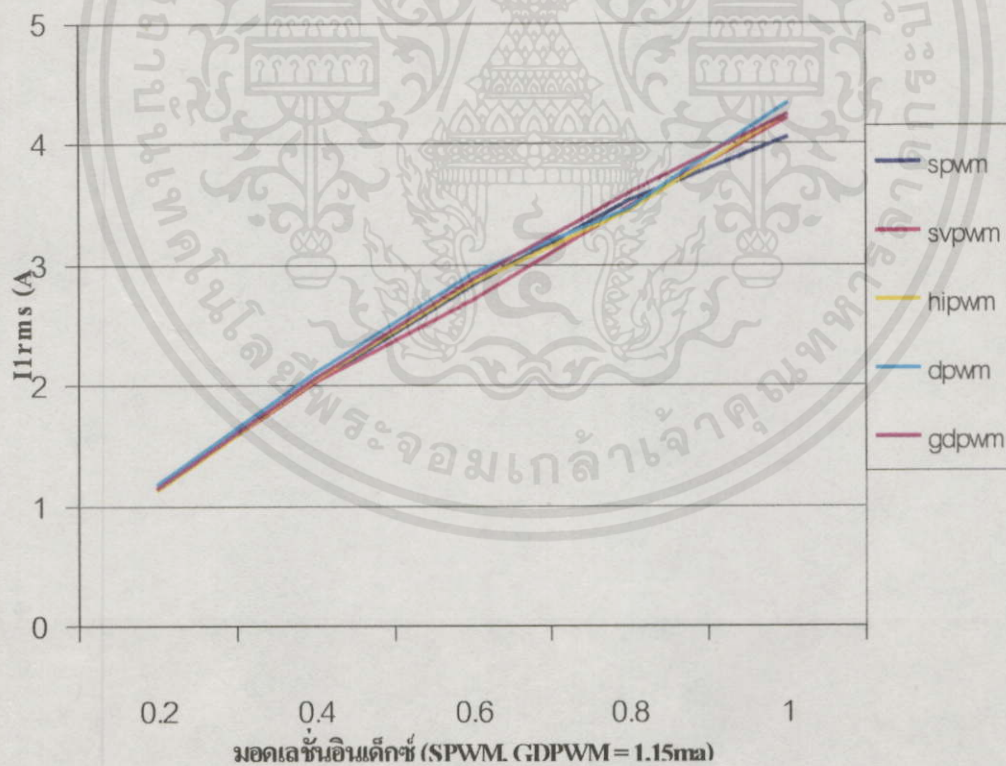
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพิกัดแมนทอลที่ได้จากไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \*  $m_a$ )

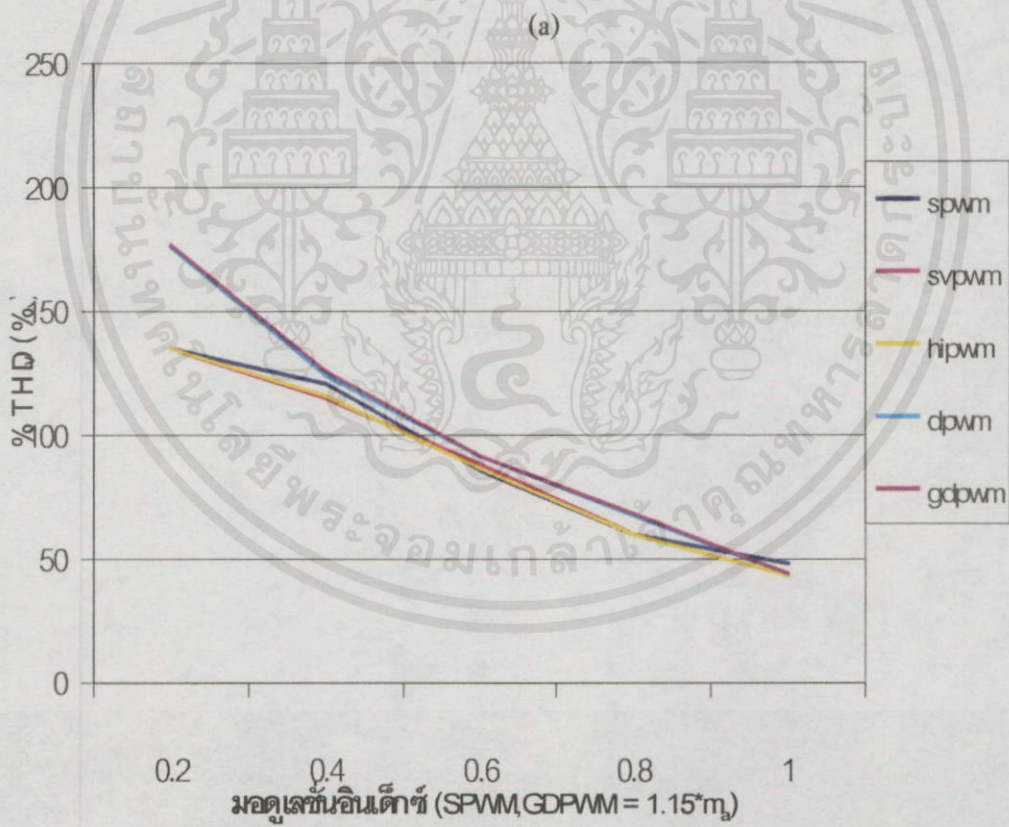
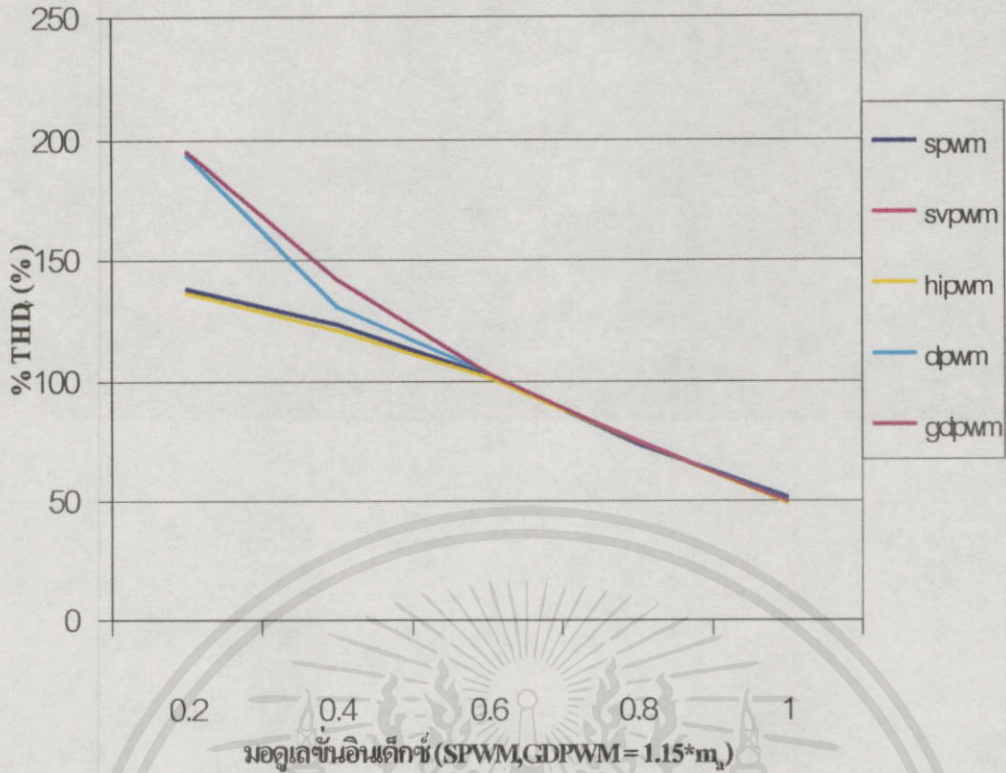
(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสฟลักซ์ที่ได้ออก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสน. อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.4 (a) ผลการทดลอง

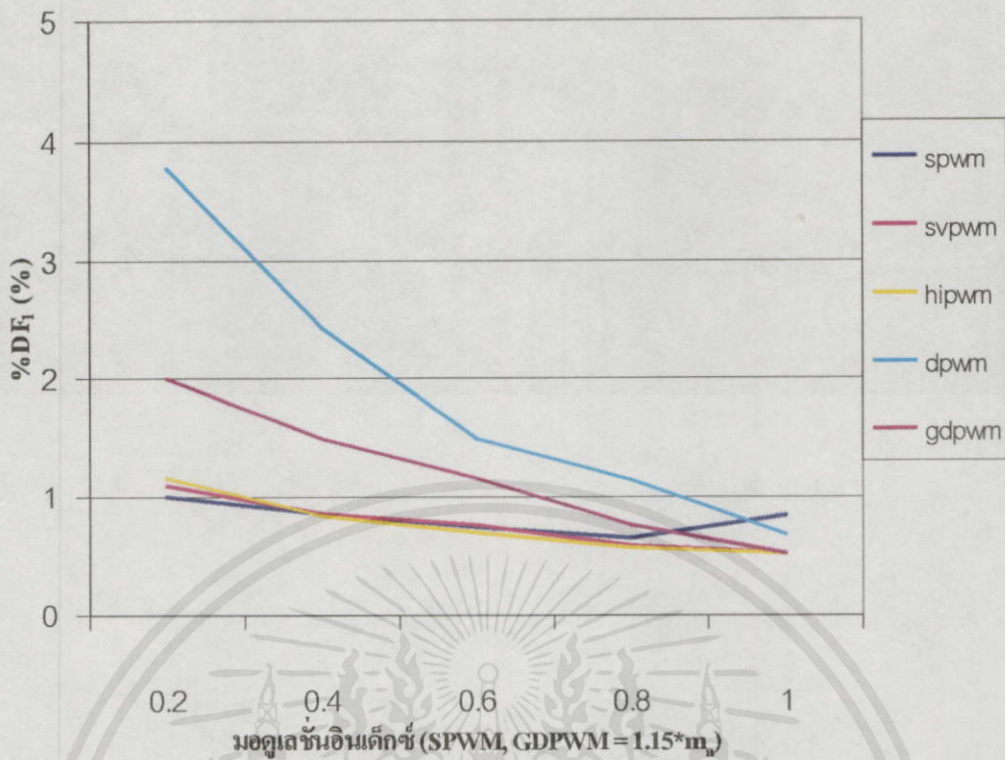
(b) ผลจำลองการทำงาน



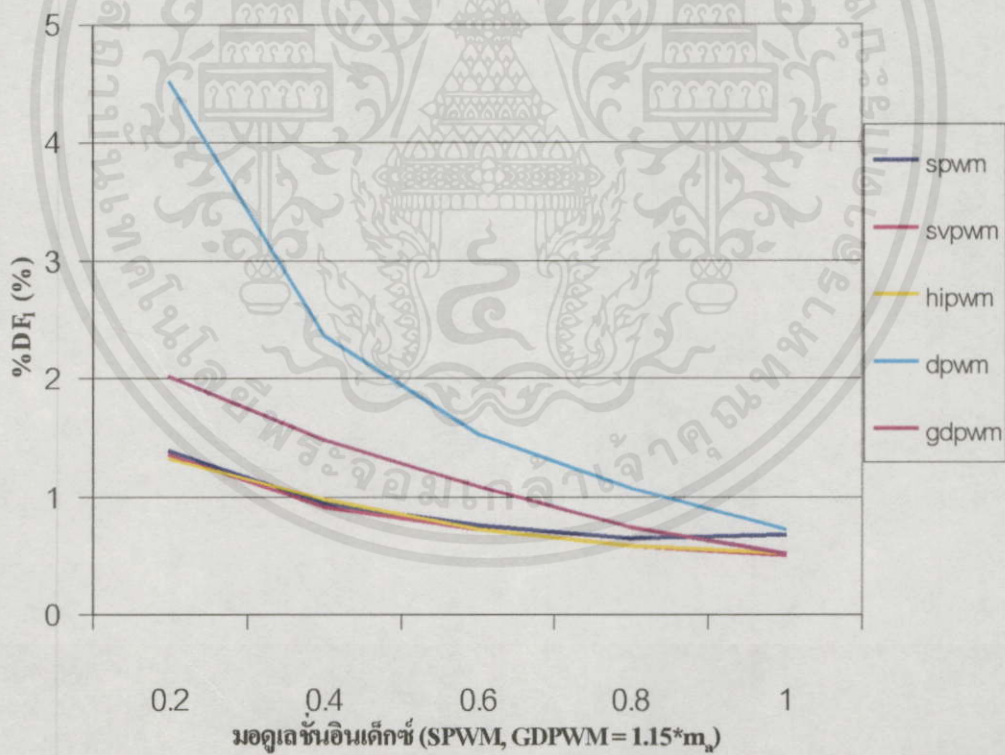
(b)

รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์ THD<sub>v</sub> ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน



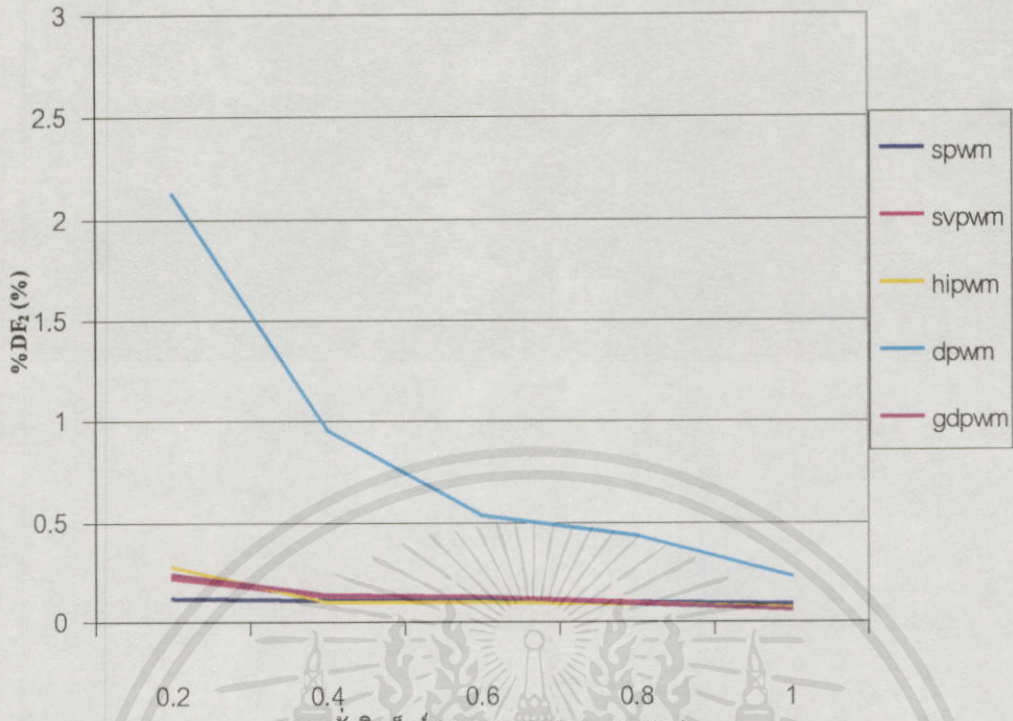
(a)



(b)

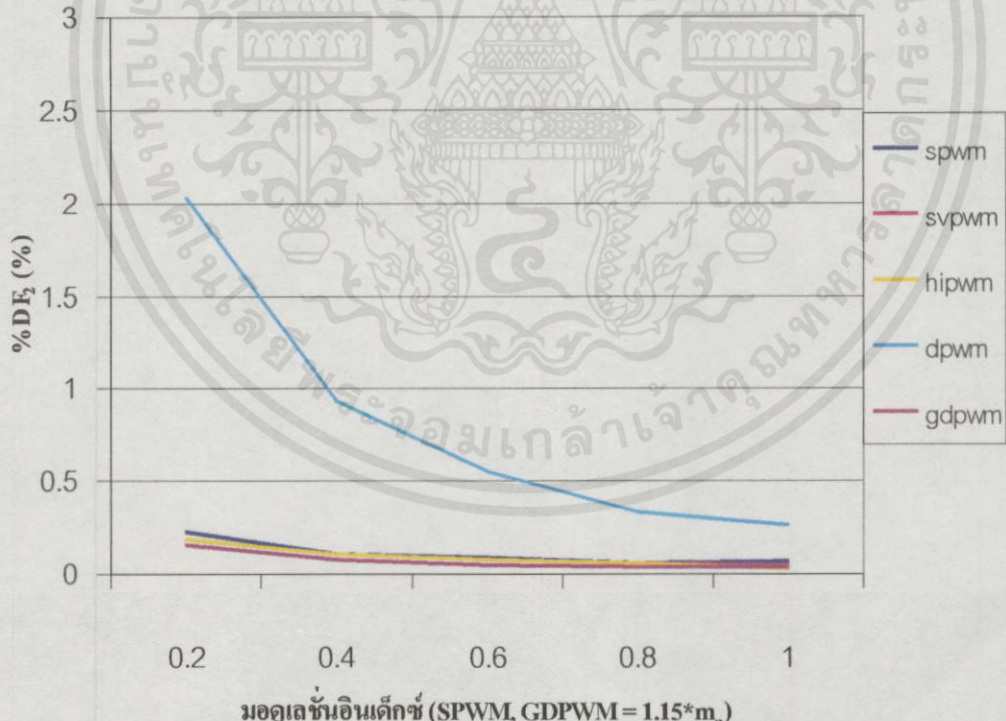
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_1$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

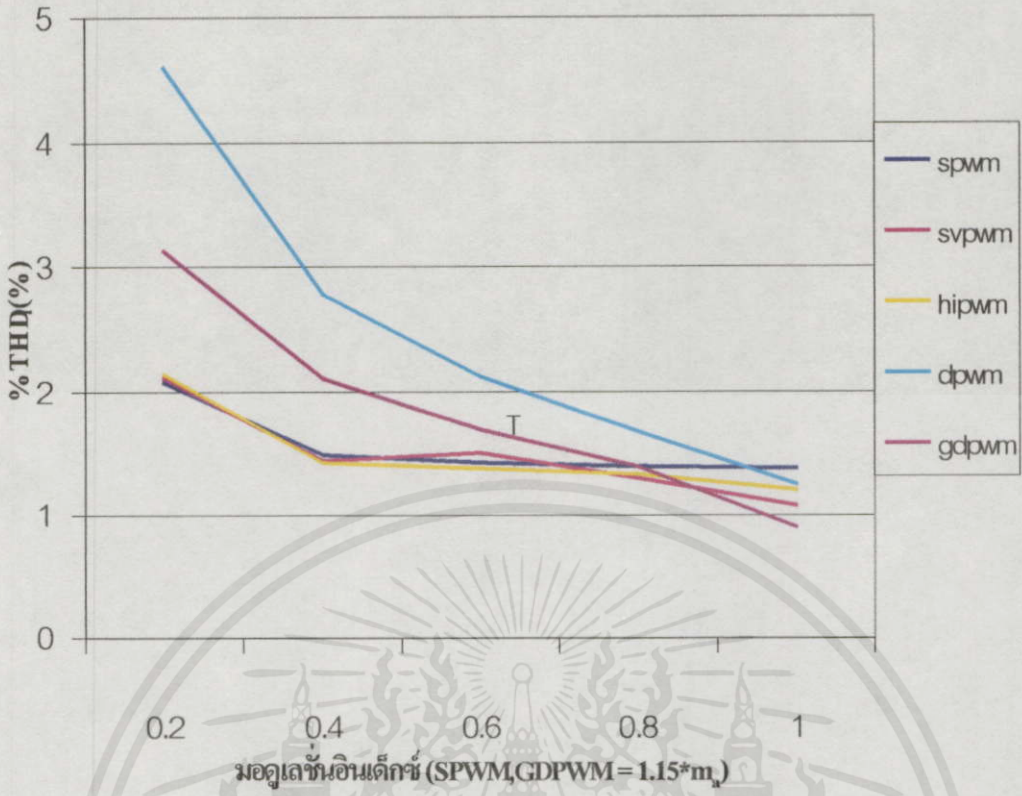
(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

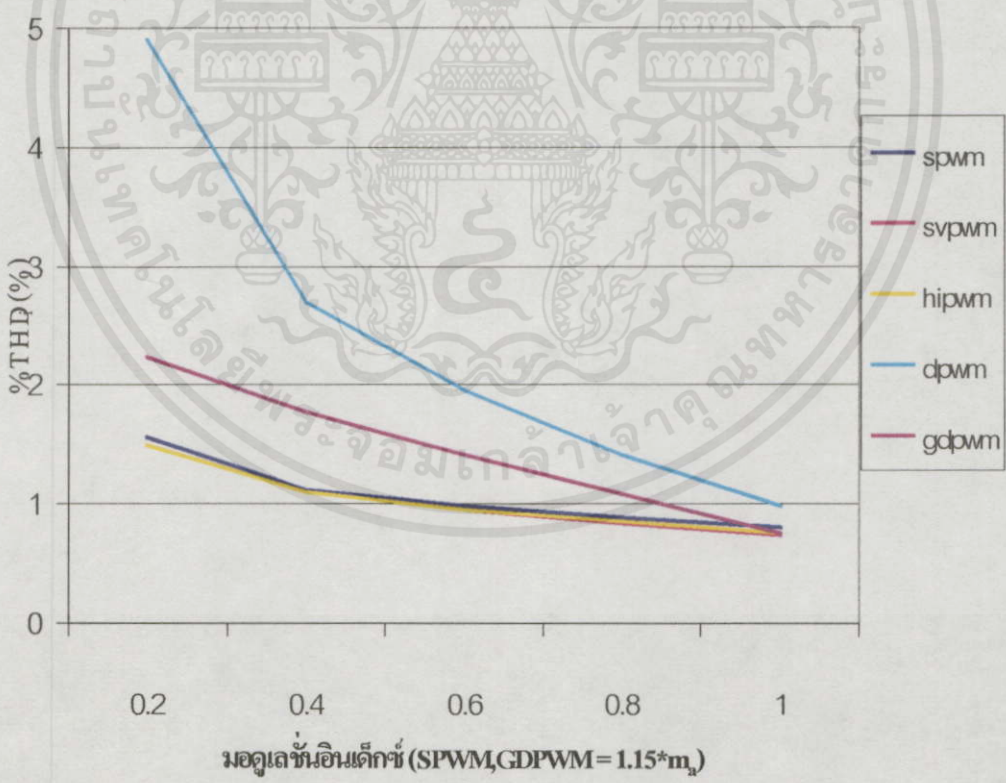
(b)

รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_2$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 5.12** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ THD ที่ได้จาก  
 ไม่ว่าจะใช้ได้อ่างอื่น ออกทางอื่น ให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.3 (a) ผลการทดลอง  
 (b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.7-5.12 แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดัน  $V_{rms}$  และค่ากระแส  $I_{rms}$  แสดงให้เห็นถึงช่วงลิเนียร์ของเทคนิคต่างๆ ที่ดีกว่าเทคนิคแบบ ค่า  $\%THD_v$ ,  $\%THD_p$ ,  $\%DF_2$ ,  $\%DF_1$  ให้ผลตรงกัน คือเทคนิคแบบ DPWM120 จะมีความผิดเพี้ยนสัญญาณมากที่สุด รองลงมาคือ เทคนิคแบบ GDPWM ในช่วงค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำๆ ส่วนเทคนิคอื่นจะได้ค่าใกล้เคียงกัน ในย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูงๆ ค่าความผิดเพี้ยนแต่ละเทคนิคจะลดลงมาใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เด็ดใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดภาระ เป็น L-L

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต									
	$V_{rms}$	$V_{rms}$	$V_{rms}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_1$	$DF_2$	$DF_2$
SPWM 0.23	42.8	40.6	72.9	69.4	137.2	134.6	1.16	1.39	0.27	0.22
0.46	87.4	86.1	137.6	135.7	121.4	111.2	0.88	0.94	0.14	0.11
0.69	132.4	130.2	180.6	177.0	92.7	82.1	0.71	0.75	0.12	0.08
0.92	177.2	172.9	209.4	205.3	62.8	57.6	0.62	0.65	0.07	0.05
1.15	210.8	206.2	236.5	231.1	50.9	48.5	0.83	0.83	0.13	0.12
HIPWM 0.2	43.1	40.6	72.8	69.3	135.4	134.0	1.15	1.33	0.27	0.19
0.4	87.5	86.3	136.4	134.9	119.3	113.0	0.87	0.93	0.14	0.10
0.6	132.9	129.5	180.4	176.8	91.7	84.6	0.67	0.72	0.09	0.06
0.8	178.0	173.1	208.7	203.8	61.02	57.5	0.62	0.59	0.08	0.06
1.0	221.8	215.5	242.6	236.5	44.1	43.9	0.51	0.51	0.06	0.04
SVPWM 0.2	43.1	41.6	72.9	69.4	135.7	134.0	1.09	1.35	0.22	0.19
0.4	88.1	86.6	136.8	135.4	118.9	112.7	0.83	0.92	0.11	0.11
0.6	133.8	130.0	181.5	177.1	91.6	84.5	0.65	0.7	0.08	0.08
0.8	177.3	173.6	207.6	204.0	60.9	57.4	0.54	0.58	0.05	0.05
1.0	221.8	216.6	242.7	237.3	44.3	43.4	0.57	0.51	0.04	0.03
DPWM120 0.2	43.6	43.31	94.2	93.64	191.1	174.0	3.86	4.88	1.69	2.2
0.4	88.9	87.2	145.1	142.7	128.7	122.4	2.55	2.63	1.05	1.07
0.6	134.1	130.8	184.9	181.3	94.9	90.8	1.77	1.71	0.71	0.66
0.8	171.8	174.7	208.5	213.1	68.7	65.8	1.29	1.32	0.53	0.55
1.0	222.7	218.3	244.5	240.2	45.2	43.9	0.81	0.84	0.31	0.31
GDPWM 0.2	42.5	40.3	89.2	89.2	193.8	176.6	2.04	2.02	0.30	0.15
0.4	87.7	83.4	143.6	126.1	129.5	126.8	1.55	1.5	0.16	0.08
0.6	132.3	127.0	184.2	178.0	96.8	92.2	1.13	1.09	0.16	0.05
0.8	177.9	170.4	217.5	209.9	70.3	68.2	0.75	0.74	0.08	0.04
1.0	223.0	213.9	245.1	235.8	45.3	44.2	0.52	0.52	0.06	0.04

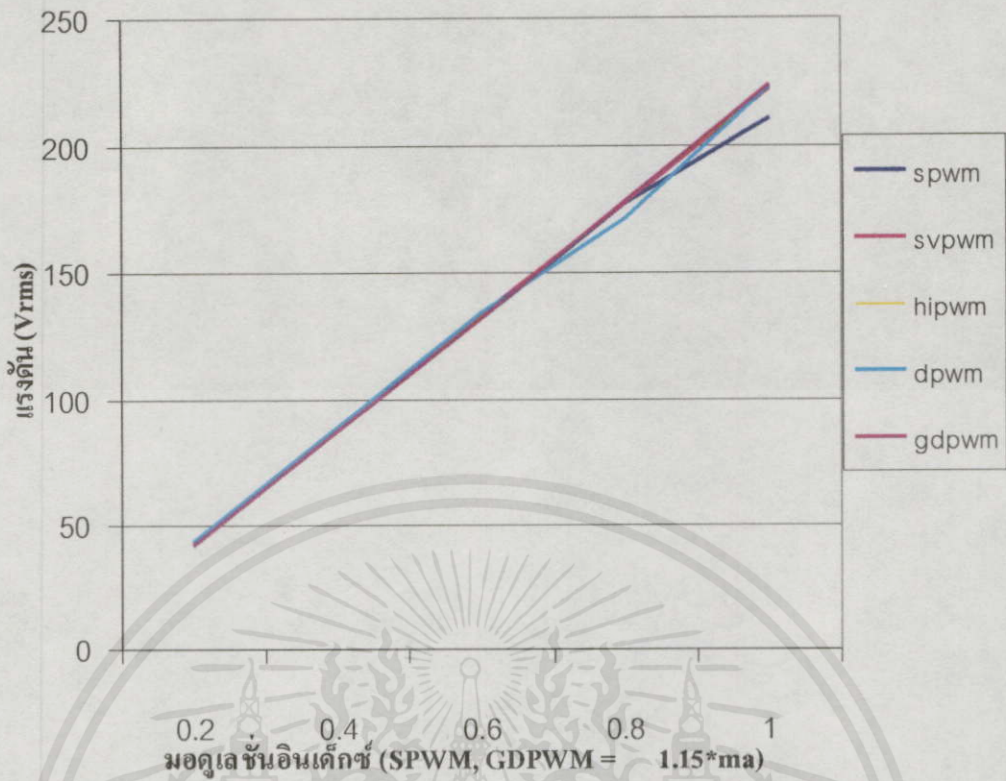
(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน)

ตารางที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินดิเคกซ์ เดคัใหม่ประมาณ 2%ของความถี่การสวิตซ์ ที่โหลดภาระเป็น L-L

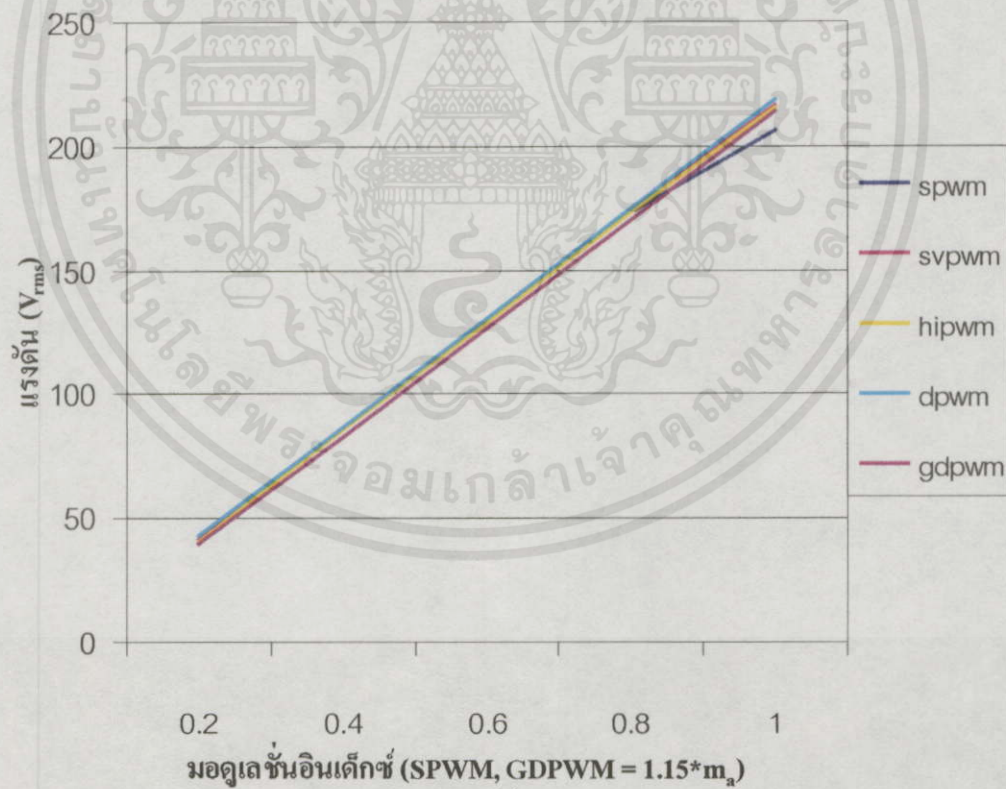
เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาต์พุท						
	$I_{1rms}$	$I_{1rms}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$	
SPWM	0.23	0.61	0.67	0.62	0.67	3.13	1.57
	0.46	1.27	1.26	1.27	1.26	1.45	0.96
	0.69	1.81	1.90	1.82	1.90	1.48	0.76
	0.92	2.35	2.48	2.35	2.49	1.22	0.66
	1.15	3.07	2.96	3.07	2.96	1.31	0.84
HIPWM	0.2	0.62	0.68	0.62	0.69	2.41	1.32
	0.4	1.21	1.23	1.21	1.23	1.46	0.94
	0.6	1.81	1.89	1.81	1.90	1.44	0.72
	0.8	2.35	2.49	2.35	2.49	1.19	0.59
	1.0	3.20	3.11	3.20	3.11	1.04	0.52
SVPWM	0.2	0.62	0.67	0.62	0.67	2.91	1.33
	0.4	1.26	1.24	1.26	1.24	1.42	0.94
	0.6	1.82	1.91	1.82	1.91	1.62	0.73
	0.8	2.36	2.49	2.36	2.49	1.23	0.57
	1.0	3.22	3.13	3.23	3.13	0.99	0.51
DPWM120	0.2	0.64	0.64	0.64	0.64	4.70	4.82
	0.4	1.28	1.25	1.28	1.25	2.75	2.55
	0.6	1.84	1.92	1.84	1.92	2.13	1.78
	0.8	2.38	2.55	2.38	2.56	1.49	1.40
	1.0	3.24	3.14	3.24	3.15	1.09	0.87
GDPWM	0.2	0.58	0.68	0.58	0.68	4.04	2.23
	0.4	1.17	1.25	1.17	1.25	2.0	1.50
	0.6	1.76	1.86	1.76	1.86	1.46	1.11
	0.8	2.36	2.44	2.36	2.44	1.26	0.75
	1.0	3.21	3.06	3.22	3.06	1.03	0.53

(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

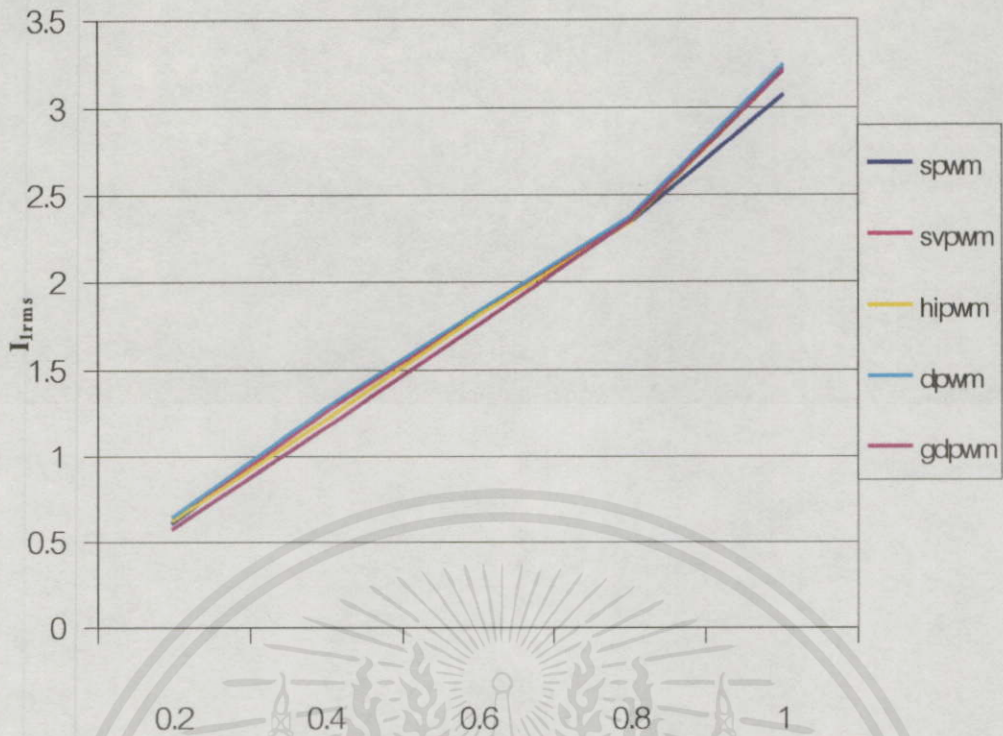


(a)



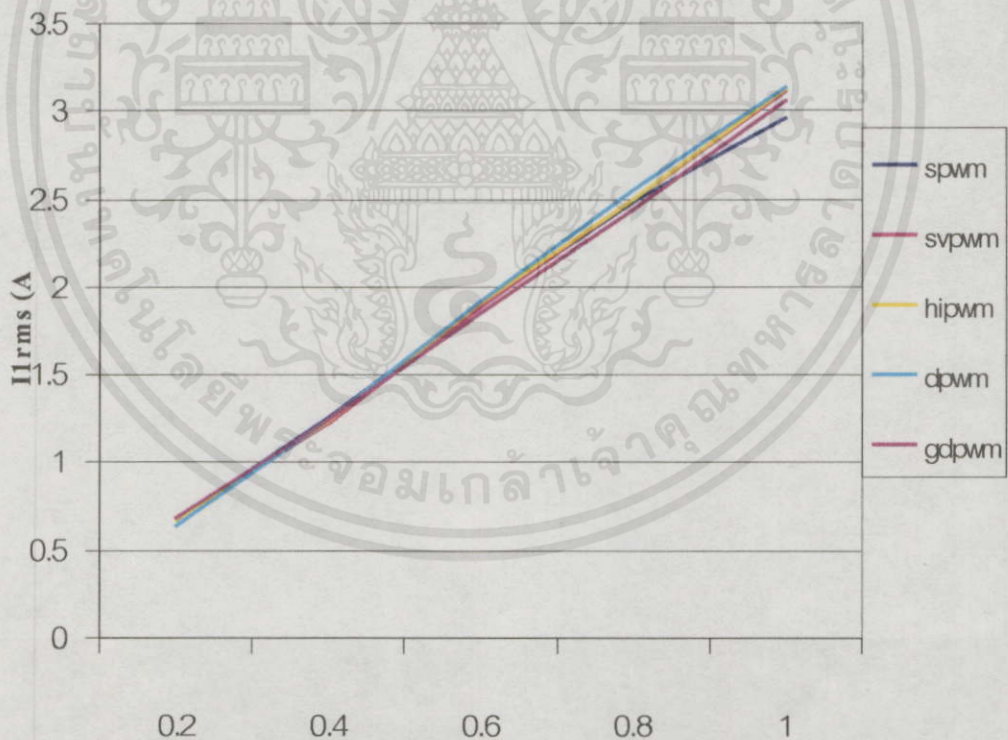
(b)

รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพื้นคานาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM =  $1.15 \cdot m_a$ )

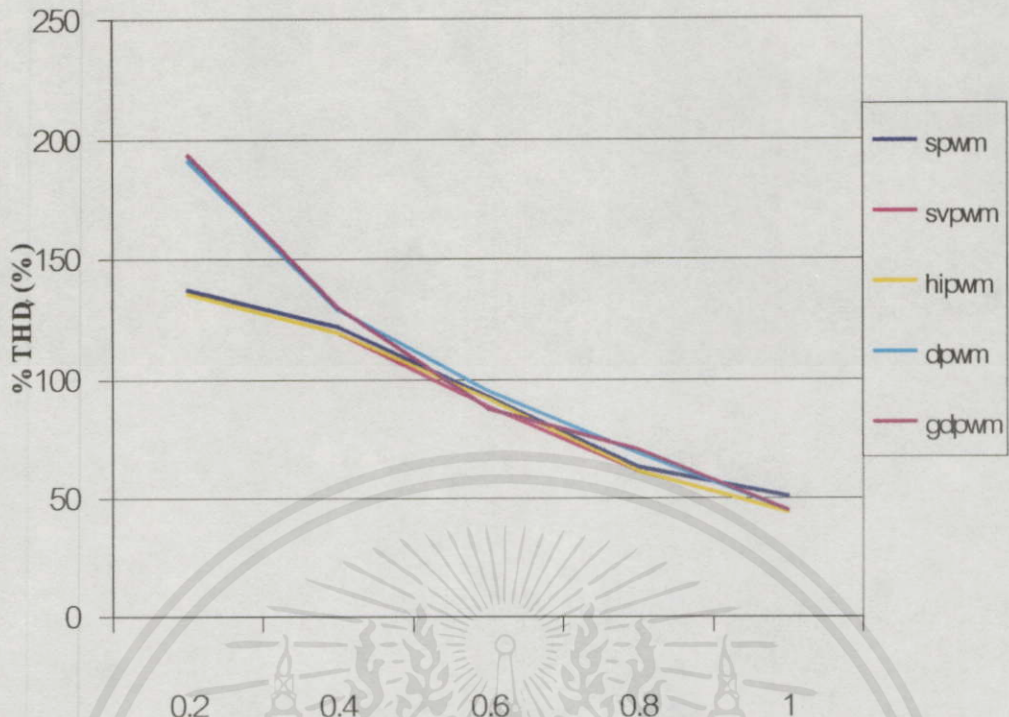
(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM =  $1.15 m_a$ )

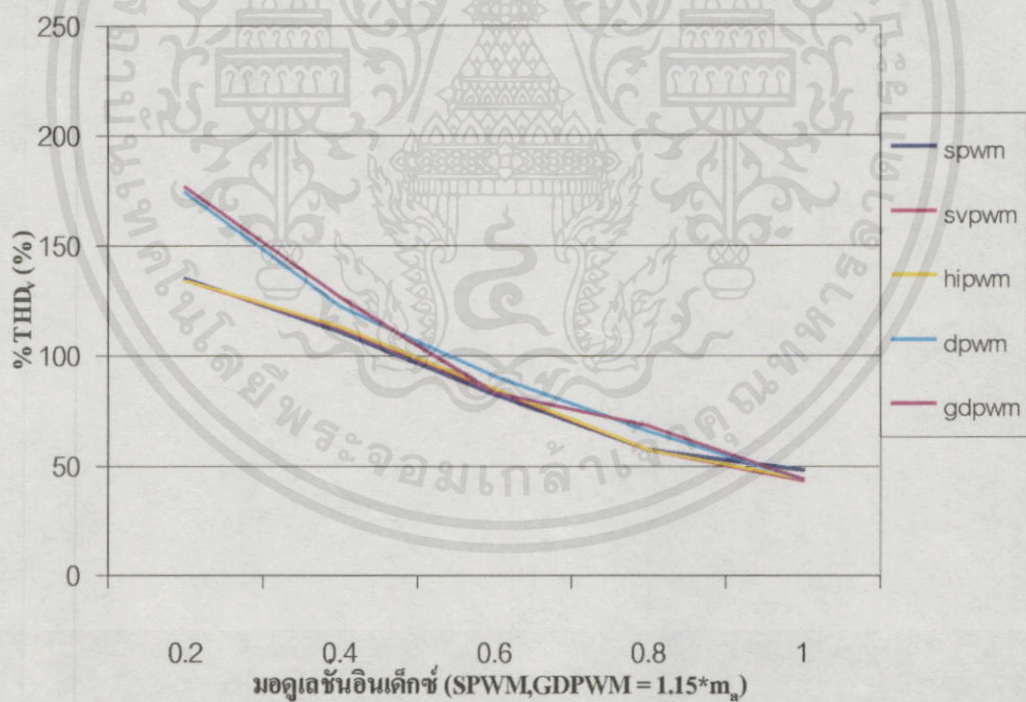
(b)

รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสฟลักซ์ตามนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.6 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>a</sub>)

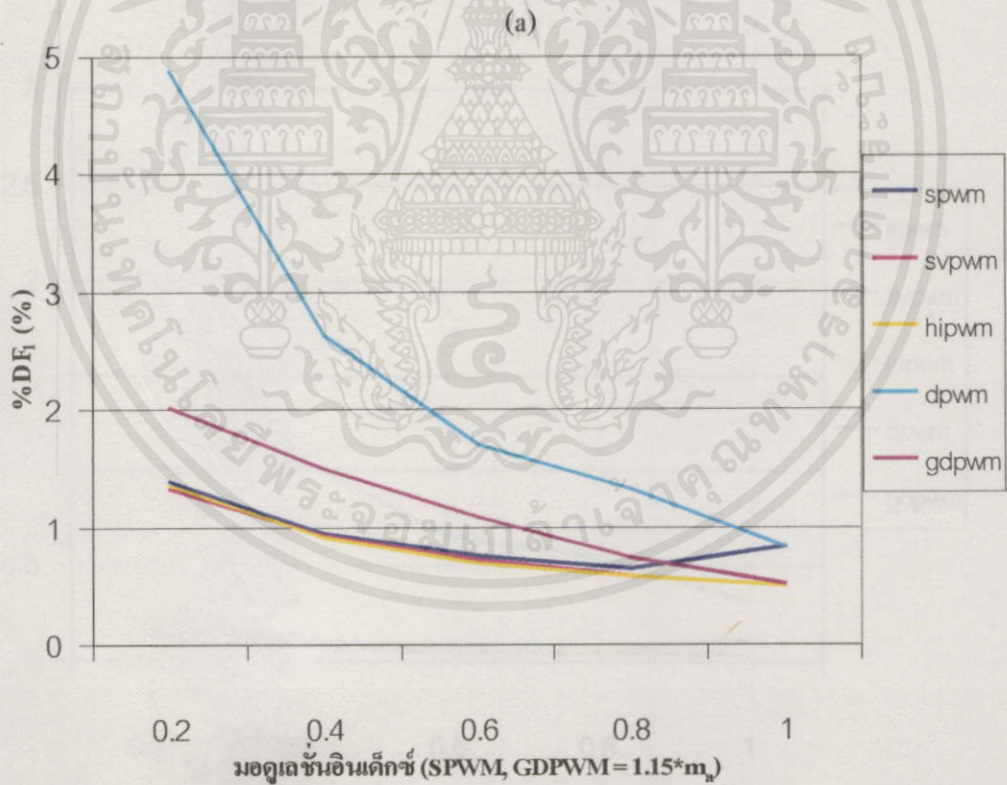
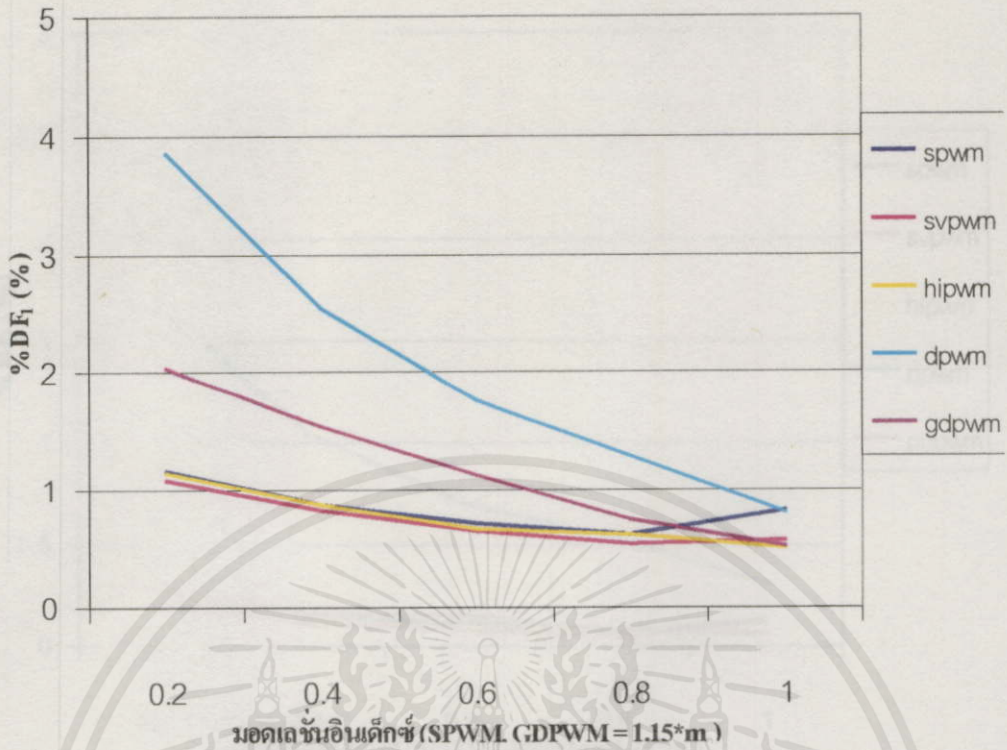
(a)



(b)

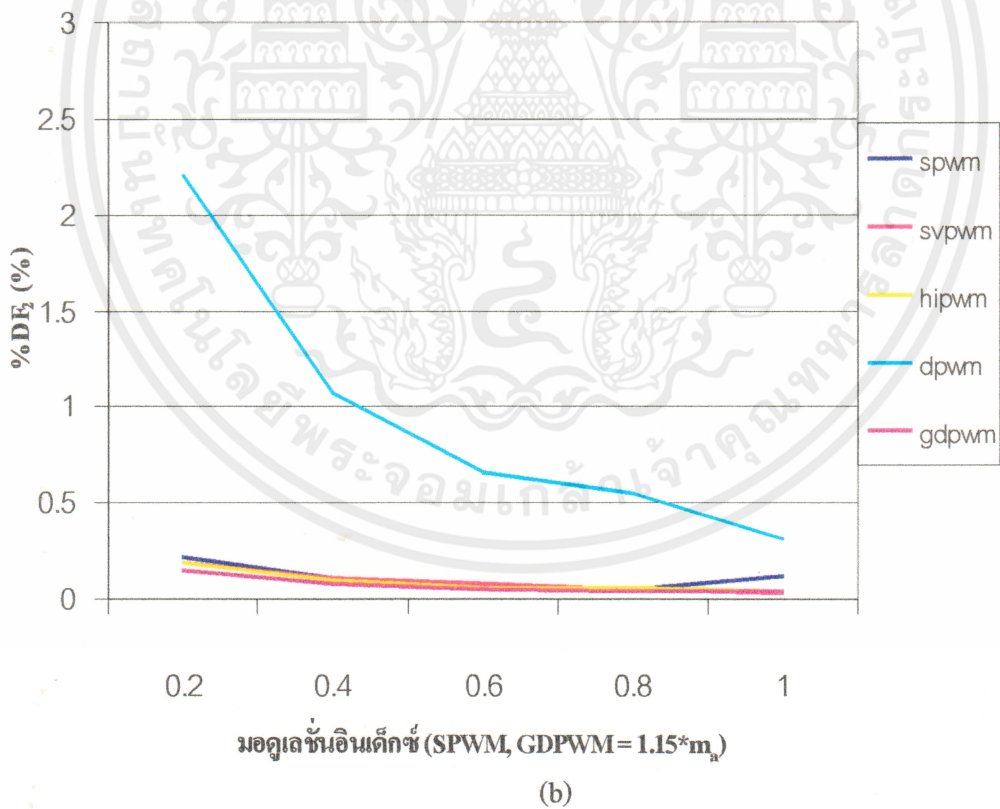
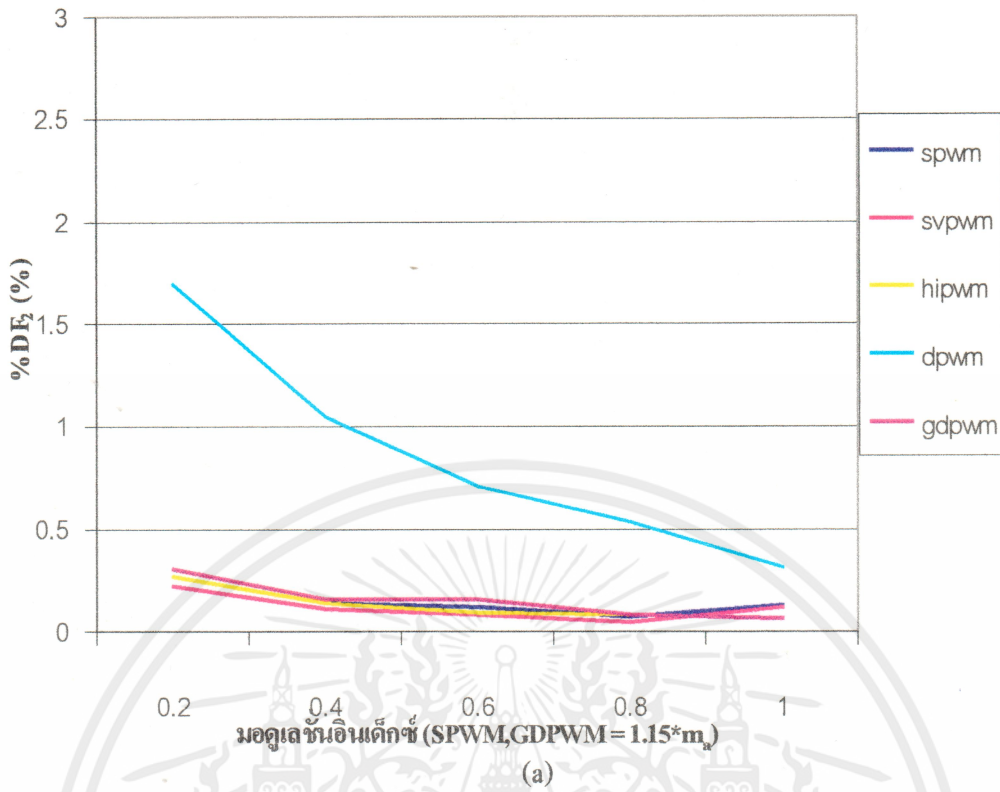
รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $THD_v$  ที่ได้จากการคำนวณการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน

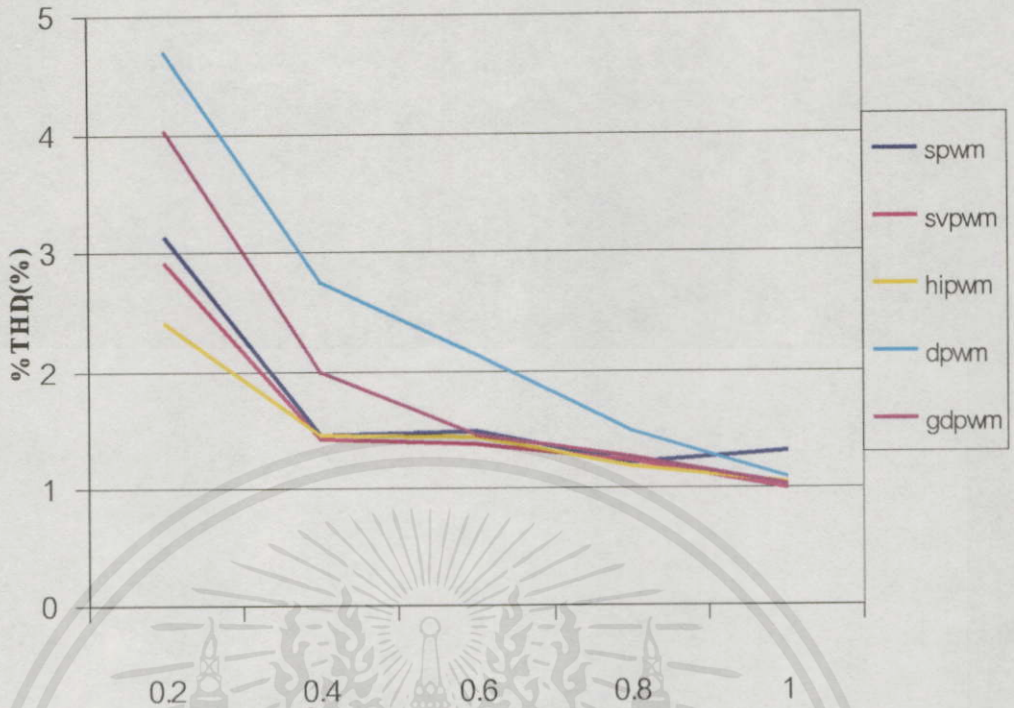


(b)

รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_1$  ใช้ประโยชน์จากการคำนวณการคำนวณการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน

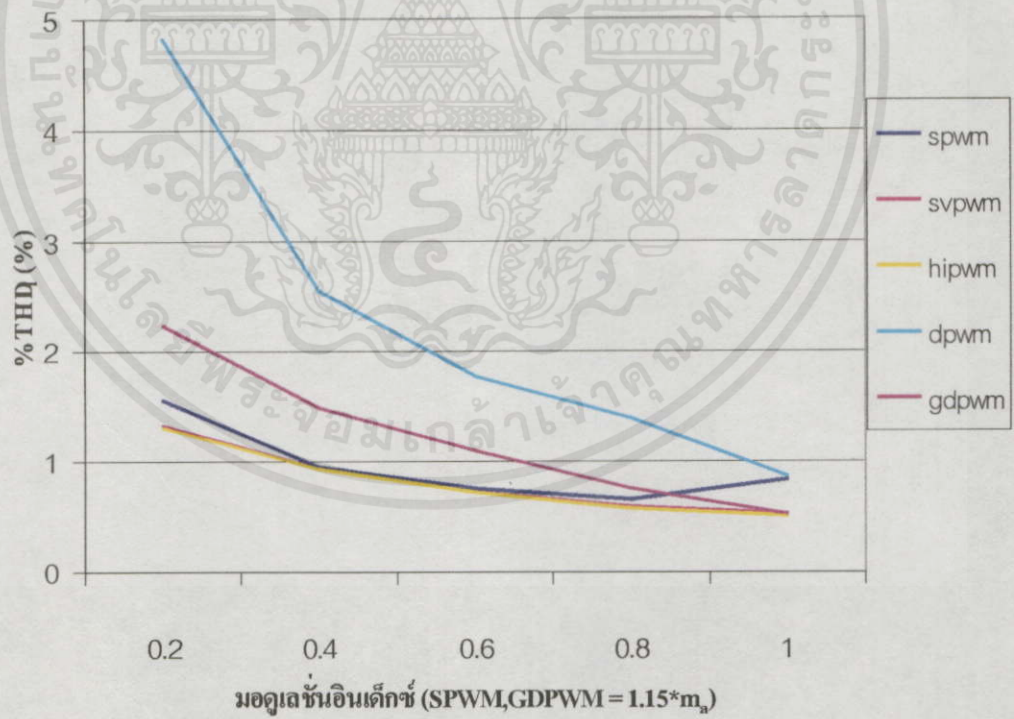


เอกสารนี้รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_2$  ใช้ประที่ ได้จาก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.5 (a) ผลการทดลอง  
(b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 5.18** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ THD. ที่ได้จาก  
 ไม่ว่าจะวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.6 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.13-5.18 แสดงให้เห็นผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และ  
ได้ผลโดยรวมเช่นเดียวกับที่การต่อโหลดแบบ R-L ค่า  $V_{1rms}$  ที่ได้จากการทดลองจะมากกว่าที่เงื่อนไข  
โหลดแบบ R-L เล็กน้อย เนื่องจากกระแสที่ผ่านตัวอุปกรณ์มีค่าน้อยทำให้แรงดันตกคร่อม  
อุปกรณ์สวิตช์น้อยกว่า

ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดู  
เลชันอินเด็กซ์ เดคิ์ใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ โหลดภาระ เป็น R

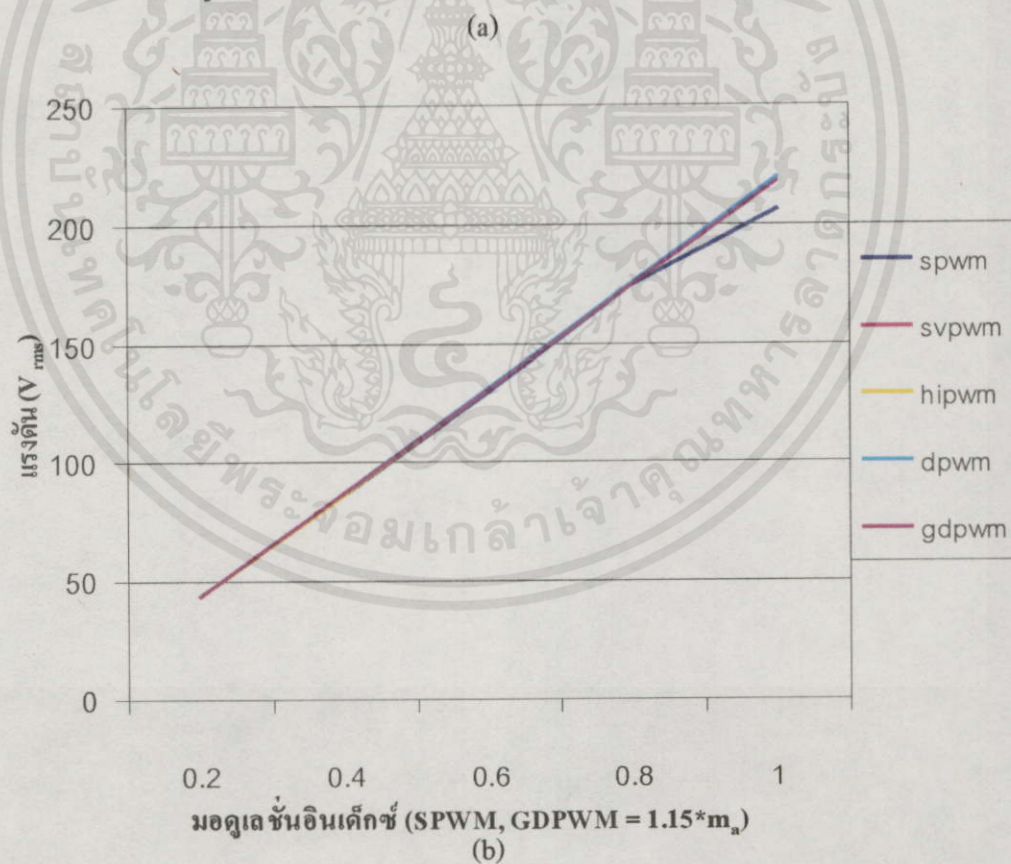
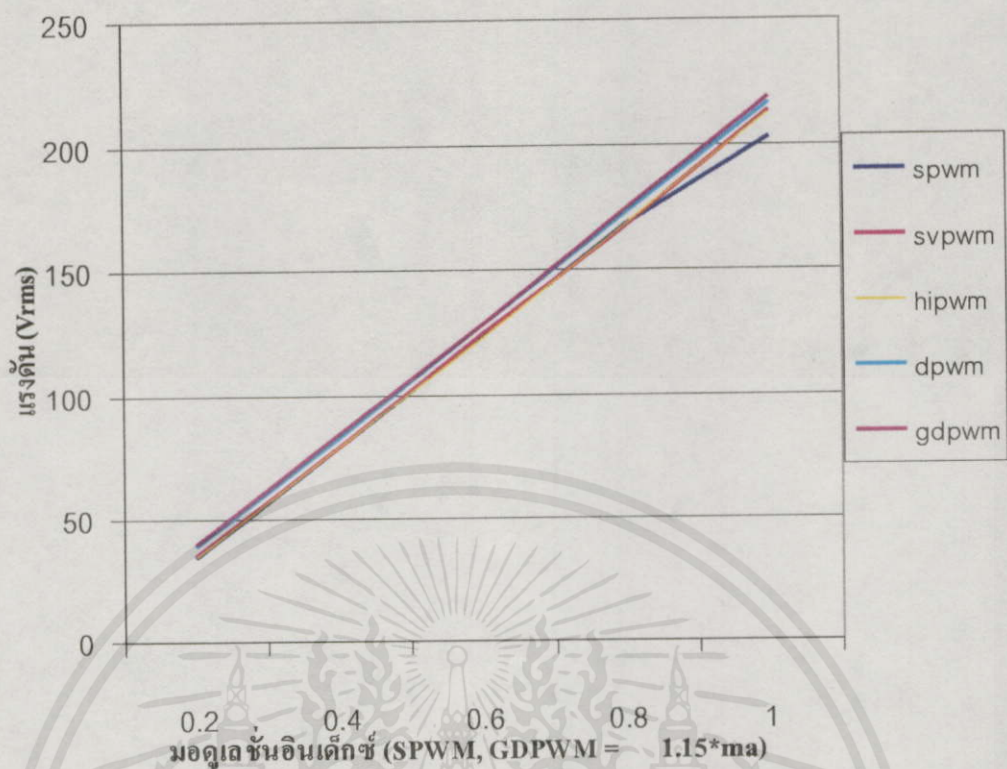
เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต										
	$V_{1rms}$	$V_{1rms}^*$	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$THD_v$	$THD_v^*$	$DF_1$	$DF_1^*$	$DF_2$	$DF_2^*$	
SPWM	0.23	34.7	43.5	59.3	74.1	137.4	133.1	1.24	0.91	0.23	0.11
	0.46	79.4	87.3	130.7	137.4	110.4	113.7	0.90	0.77	0.17	0.05
	0.69	124.2	130.0	172.2	178.0	96.1	82.0	0.71	0.66	0.07	0.04
	0.92	168.8	174.4	202.1	206.5	65.6	56.9	0.63	0.59	0.06	0.02
	1.15	203.2	206.2	229.0	231.9	52	48.5	0.77	0.82	0.12	0.12
HIPWM	0.2	35.1	43.6	59.8	73.7	136.7	133.8	1.27	0.86	0.25	0.05
	0.4	79.3	86.7	124.9	135.4	121.4	119.0	0.97	0.75	0.18	0.10
	0.6	122.9	130.9	170.5	177.9	96.1	83.6	0.72	0.61	0.09	0.02
	0.8	168.5	174.7	198.6	204.6	57.1	56.1	0.61	0.51	0.04	0.03
	1.0	212.9	218.3	233.0	239.1	44.4	43.2	0.56	0.50	0.09	0.03
SVPWM	0.2	35.3	43.8	60.1	74.1	136.6	133.7	1.23	0.88	0.22	0.09
	0.4	79.3	87.8	125.3	136.8	121.6	112.5	0.87	0.79	0.13	0.05
	0.6	124.6	131.4	172.0	178.3	95.1	91.6	0.70	0.75	0.10	0.04
	0.8	167.8	175.2	200.1	204.7	64.7	55.9	0.57	0.61	0.08	0.02
	1.0	213.9	219.1	233.6	239.2	43.8	42.6	0.60	0.48	0.13	0.02
DPWM120	0.2	39.2	43.7	86.9	94.2	197.4	193.3	3.37	1.82	1.38	0.05
	0.4	83.4	87.7	137.6	142.9	131.0	121.8	1.88	1.41	0.60	0.06
	0.6	128.4	131.6	179.2	181.7	97.3	90.22	1.23	1.03	0.30	0.03
	0.8	172.7	175.5	211.4	213.6	70.4	69.5	1.02	0.69	0.34	0.02
	1.0	216.5	219.4	238.1	240.7	45.77	45.2	0.68	0.49	0.21	0.02
GDPWM	0.2	39.8	43.9	87.5	94	195.3	171.0	1.97	1.82	0.26	0.04
	0.4	84.5	87.4	139.1	142.5	130.6	128.7	1.49	1.42	0.15	0.03
	0.6	128.5	131.1	179.0	181.3	96.8	90.2	1.11	1.03	0.13	0.02
	0.8	174.2	174.6	213.2	212.8	70.4	65.5	0.74	0.69	0.08	0.02
	1.0	218.9	218.2	239.5	239.4	47.7	45.2	0.52	0.49	0.05	0.02

(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน)

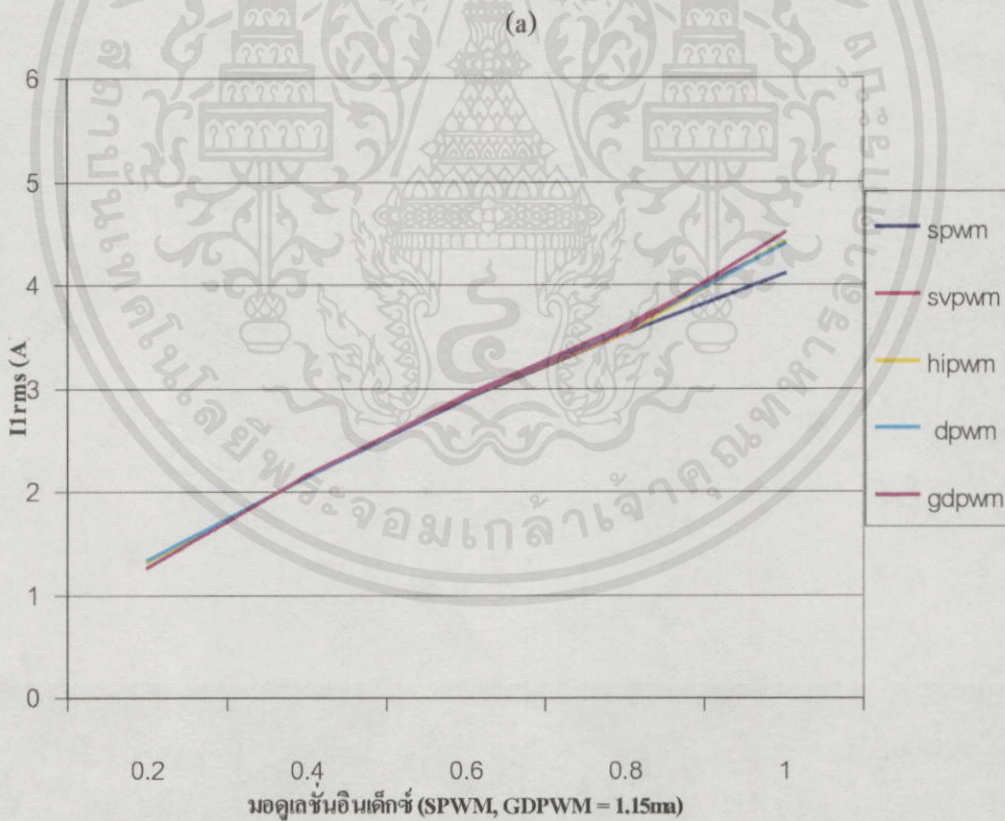
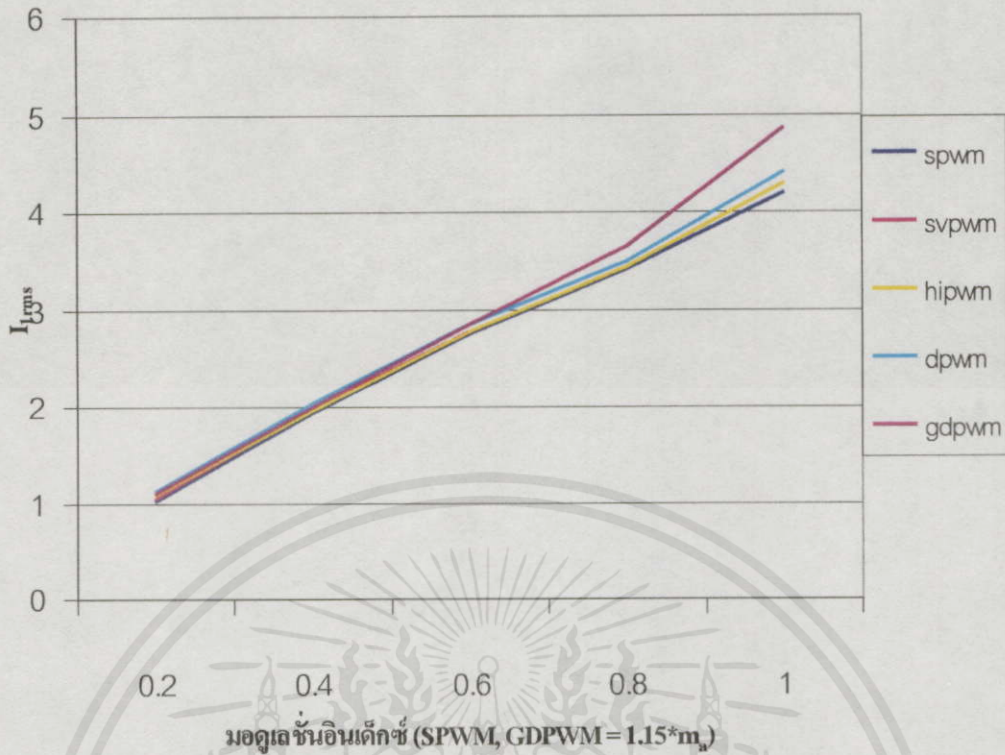
ตารางที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เด็ดใหม่ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดภาระเป็น R

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาต์พุต					
	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$
SPWM	0.23	1.03	1.32	1.80	3.12	137.8
	0.46	1.95	2.15	3.13	3.75	124.0
	0.69	2.76	2.90	3.87	4.10	96.7
	0.92	3.41	3.54	3.97	4.40	59.5
	1.15	4.20	4.10	4.70	4.78	51.6
HIPWM	0.2	1.09	1.31	1.80	3.12	133.3
	0.4	1.96	2.14	3.09	3.74	122.1
	0.6	2.78	2.91	3.85	4.70	95.7
	0.8	3.44	3.54	3.96	4.41	59.1
	1.0	4.3	4.41	4.73	4.90	43.8
SVPWM	0.2	1.04	1.33	1.75	3.14	134.6
	0.4	1.98	2.15	3.1	3.74	121.1
	0.6	2.78	2.93	3.86	4.18	95.7
	0.8	3.44	3.60	3.96	4.40	57.5
	1.0	4.30	4.40	4.70	4.91	48.7
DPWM120	0.2	1.12	1.33	2.50	3.21	196.2
	0.4	2.04	2.15	3.40	3.73	132.7
	0.6	2.85	2.92	4.0	4.20	97.9
	0.8	3.5	3.56	4.14	4.44	62.9
	1.0	4.4	4.40	4.80	4.93	45.3
GDPWM	0.2	1.10	1.26	2.39	3.0	192.8
	0.4	2.0	2.16	3.3	3.75	130.7
	0.6	2.85	2.91	3.97	4.19	97.2
	0.8	3.65	3.55	4.40	4.40	70.6
	1.0	4.86	4.50	5.40	5.10	46.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



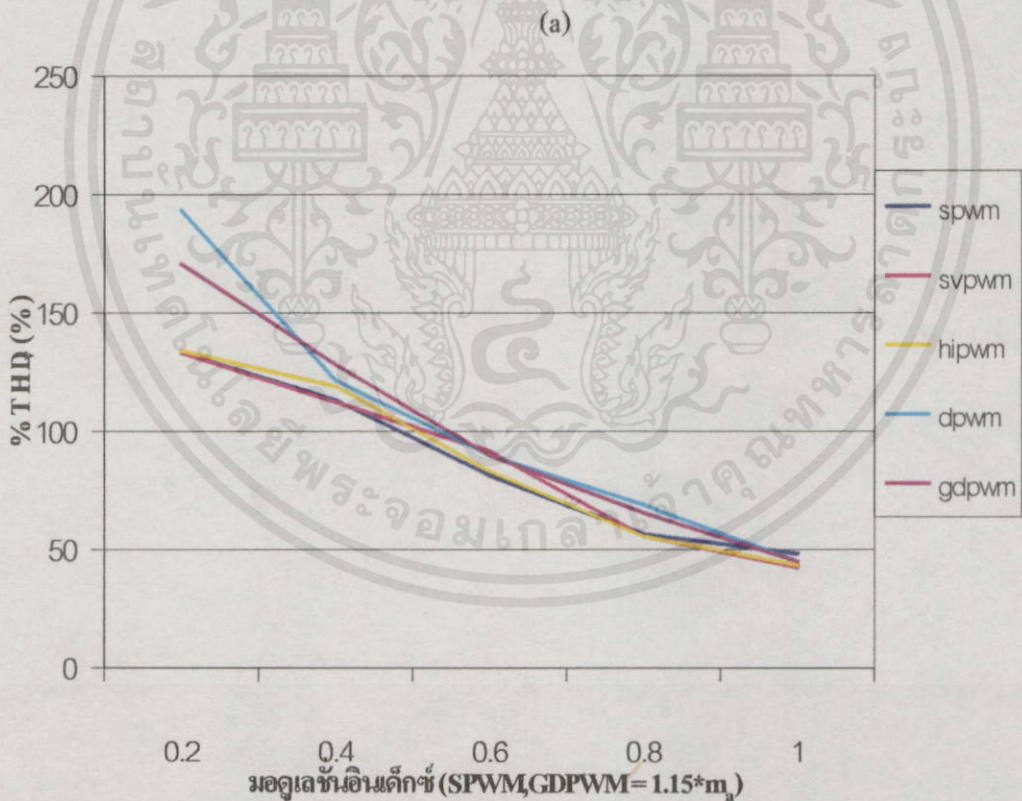
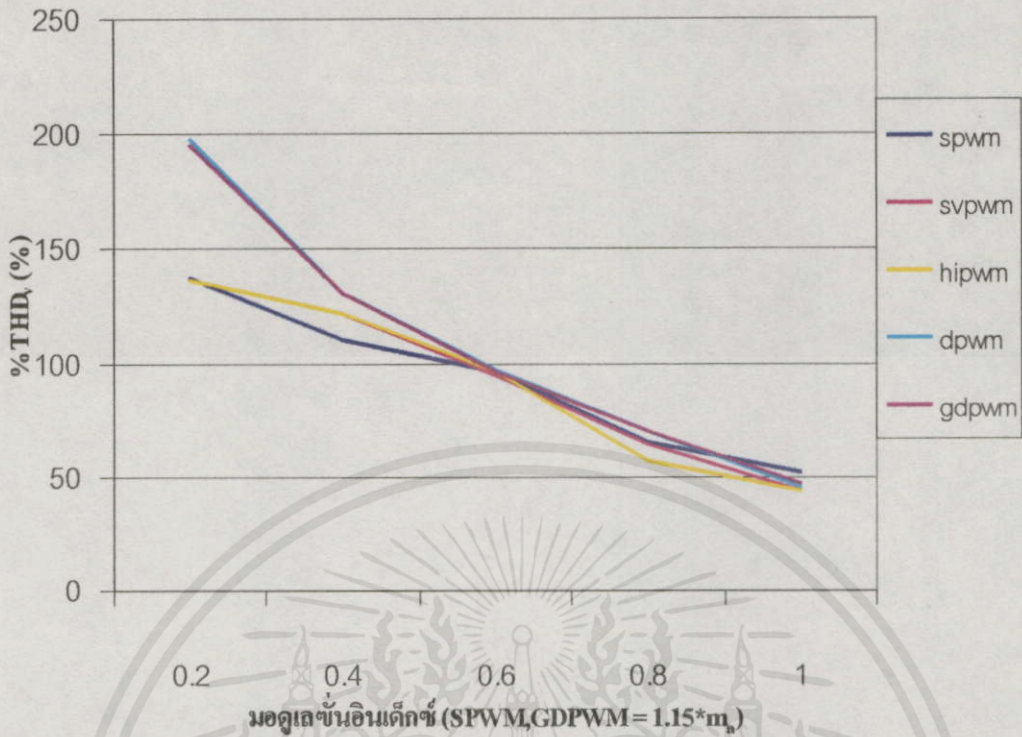
รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพื้นค่าเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



(a)

(b)

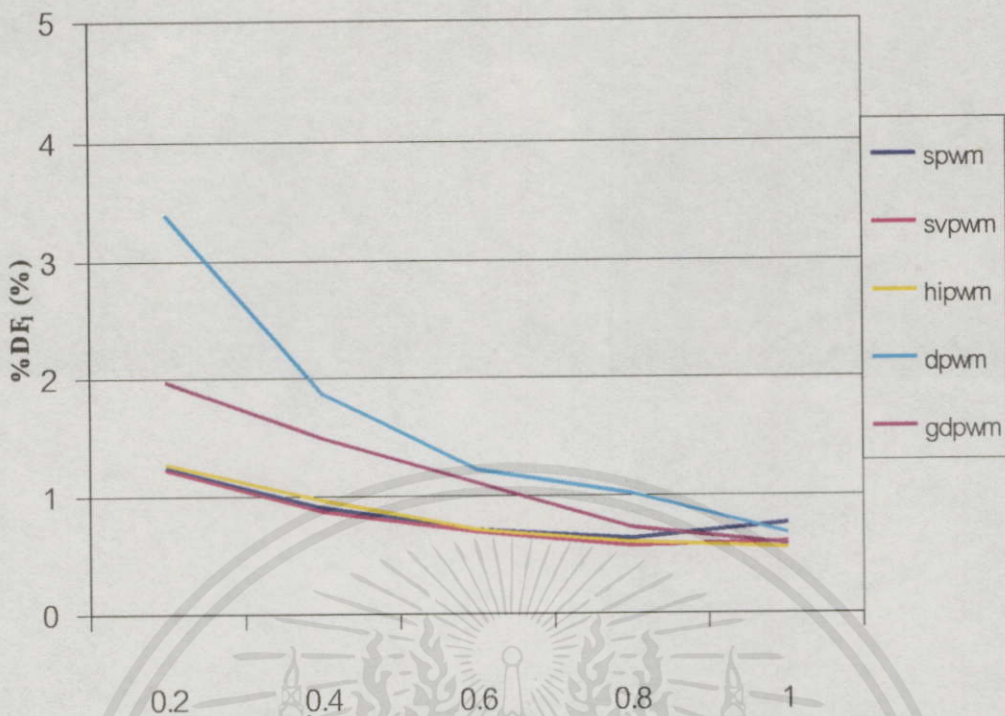
รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสฟลักซ์ค่านานทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.8 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



(b)

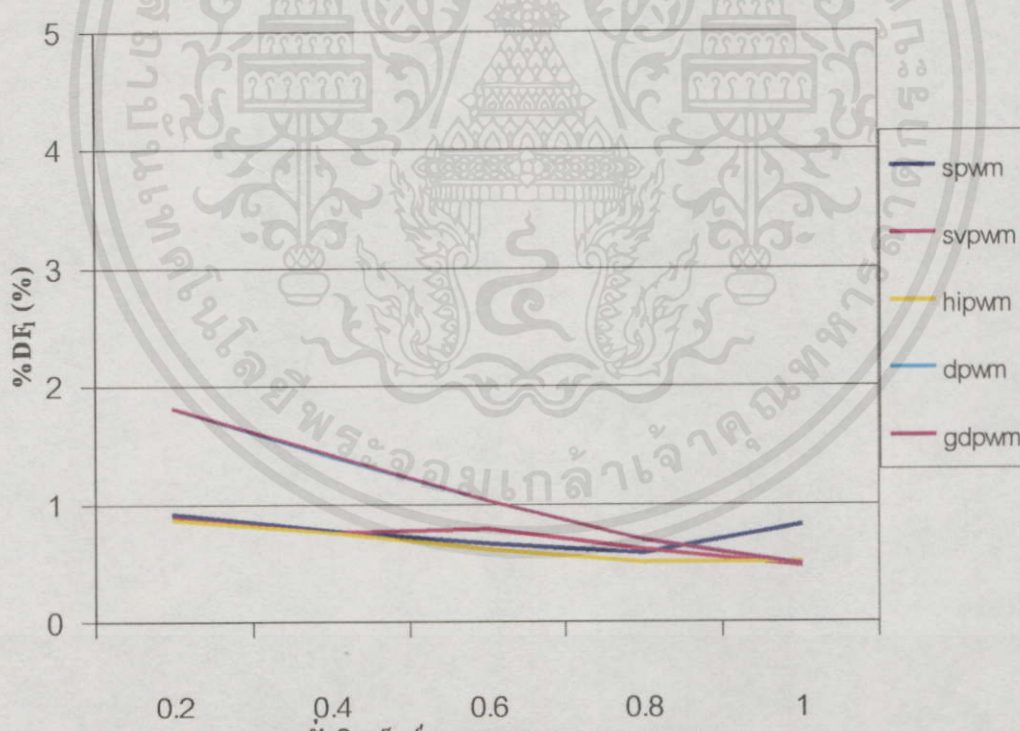
รูปที่ 5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $THD_r$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>n</sub>)

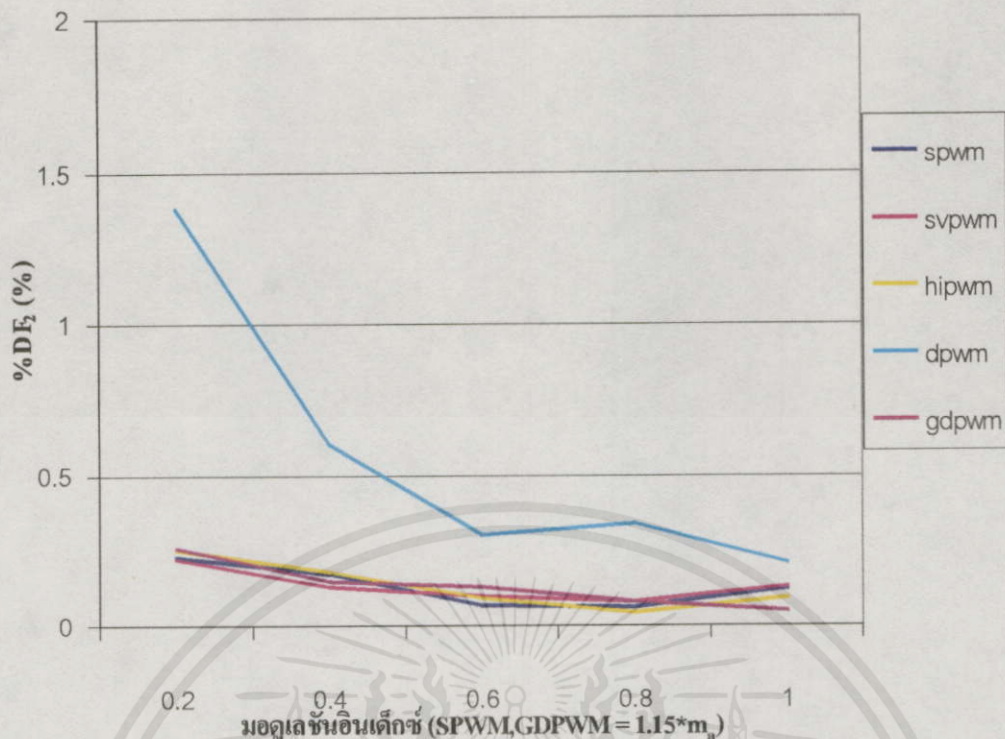
(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>n</sub>)

(b)

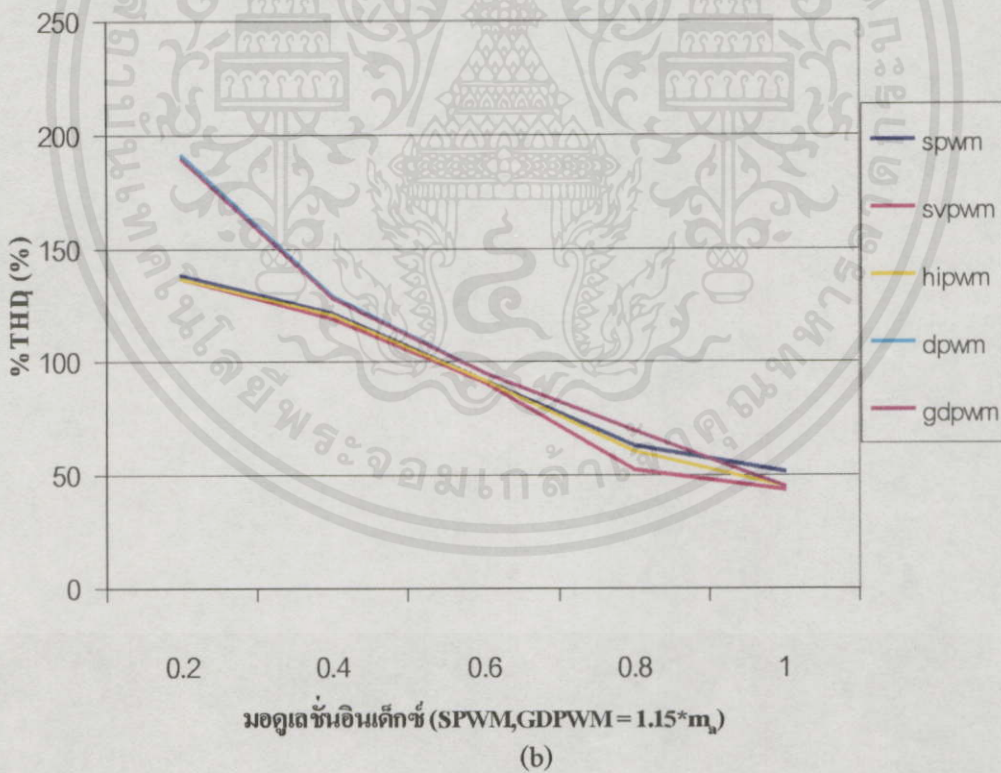
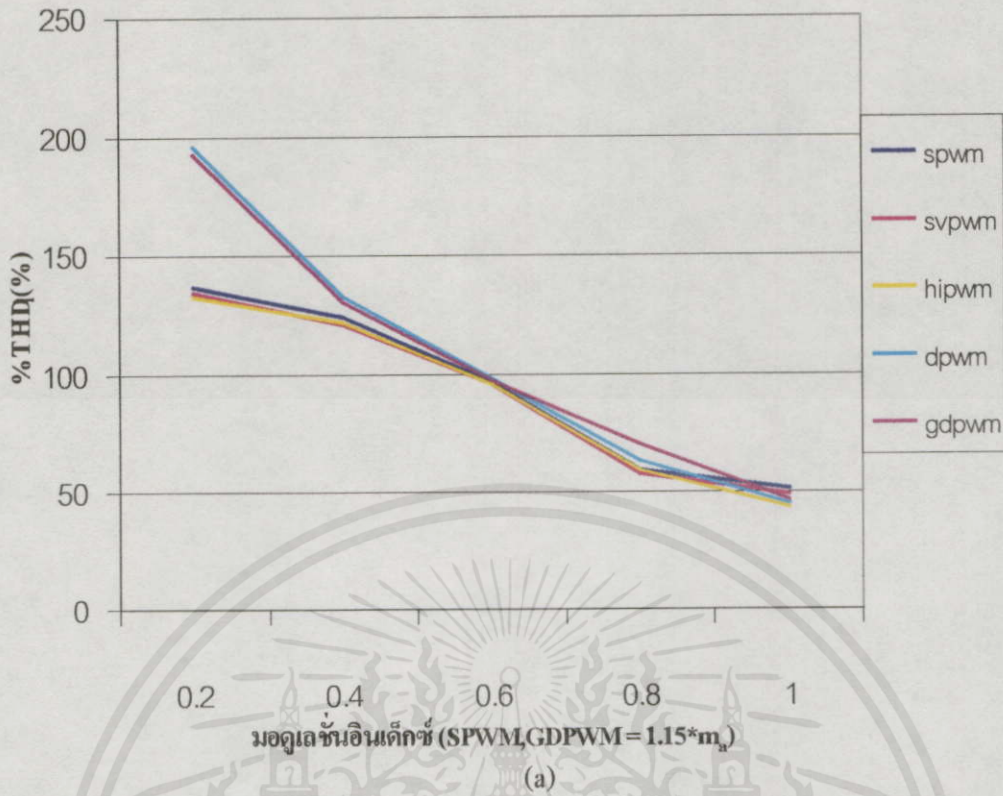
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_1$  ใช้ประจำการค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



(b)

รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_2$  ที่ได้จาก

เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.7 (a) ผลการทดลอง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น (b) ผลจำลองการทำงาน เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์  $THD_i$  ที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.8 (a) ผลการทดลองไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.19-5.24 แสดงให้เห็นผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และได้ผลโดยรวมสรุปได้เช่นเดียวกับที่การต่อโหลดแบบ R-L ค่า  $V_{rms}$  ที่ได้จากการทดลองจะน้อยกว่าที่เงื่อนไขโหลดแบบ L-L เล็กน้อย เนื่องจากกระแสที่ผ่านตัวอุปกรณ์มีค่ามากกว่าทำให้แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์มากกว่าด้วย ค่า  $\%DF_1$  จากการทดลองและการวิเคราะห์การทำงานของ DPWM ให้ผลต่างกันอยู่บ้าง

ตารางที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เด็ดใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดการะ เป็น R-L

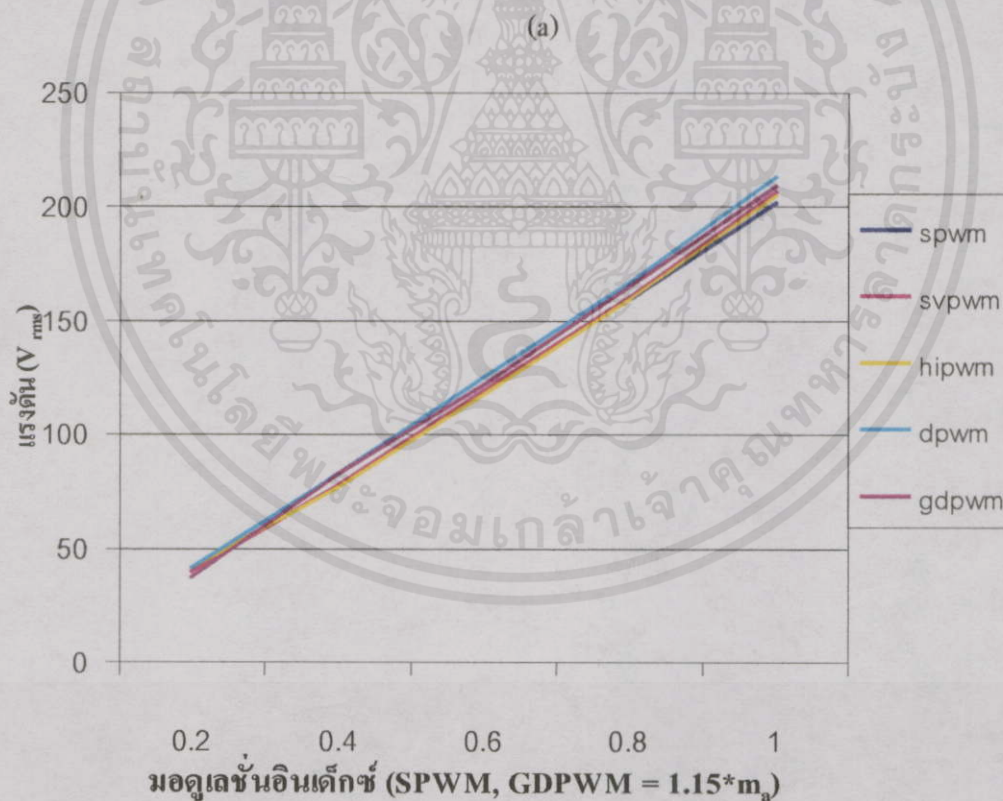
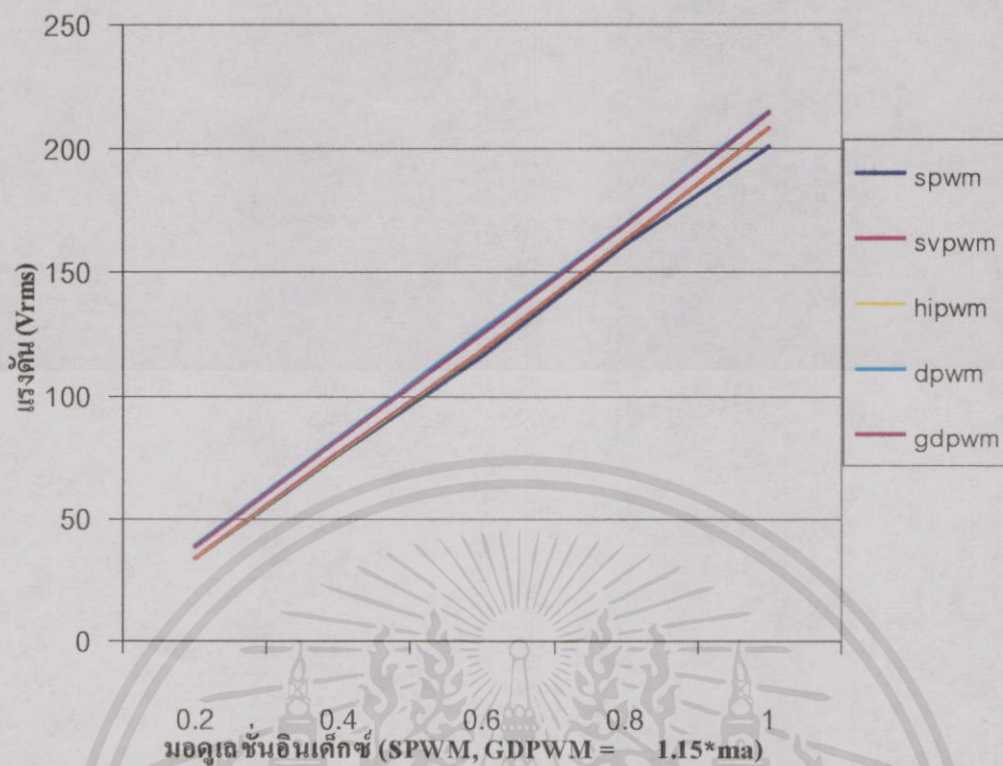
เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต										
	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$THD_v$	$THD_v^*$	$DF_1$	$DF_1^*$	$DF_2$	$DF_2^*$	
SPWM	0.23	33.9	39.9	58.5	69.6	140	135.3	2.00	2.02	0.53	0.46
	0.46	76.2	77.8	122.8	125.0	126.3	117.0	1.41	1.51	0.26	0.24
	0.69	116.6	118.0	168.8	169.0	102.3	91.0	1.02	1.10	0.16	0.19
	0.92	162.0	160.0	198.8	196.0	78.9	64.0	0.84	0.85	0.13	0.12
	1.15	201.0	202.0	231.2	228.0	58.1	49.0	0.67	0.68	0.07	0.07
HIPWM	0.2	34.18	41.4	59.2	63.0	141.2	134.0	1.89	2.56	0.49	0.44
	0.4	76.4	77.7	122.2	124.6	124.7	117.3	1.33	1.54	0.24	0.24
	0.6	118.3	118.1	168.2	167.8	100.9	93.1	0.98	1.08	0.15	0.17
	0.8	162.9	159.8	199.1	196.0	78.8	65.1	0.76	0.84	0.11	0.12
	1.0	208.7	205.0	229.9	227.0	52.7	45.5	0.59	0.64	0.08	0.08
SVPWM	0.2	34.2	40.1	69.5	56.6	142.3	139.2	2.02	2.59	0.44	0.59
	0.4	76.7	78.3	122.7	125.3	124.7	116.8	1.29	1.47	0.23	0.23
	0.6	118.6	119.3	168.2	168.3	100.5	92.1	1.04	1.09	0.20	0.19
	0.8	163.2	160.3	199.2	198.3	69.8	65.15	0.76	0.50	0.12	0.12
	1.0	208.5	206.6	230.5	225.0	47.1	45.3	0.60	0.62	0.06	0.06
DPWM120	0.2	39.4	41.3	88.6	90.7	201.2	177.4	8.69	10.06	4.2	4.9
	0.4	83.3	83.3	139.3	139.1	133.9	127.4	4.18	4.73	1.92	2.2
	0.6	126.6	125.4	179.2	177.5	100.1	93.5	2.67	2.85	1.2	1.3
	0.8	169.9	167.0	210.6	208.3	73.2	70.2	1.97	2.02	0.89	0.86
	1.0	215.3	213.1	238.5	235.0	47.5	45.2	1.28	1.34	0.57	0.60
GDPWM	0.2	38.4	37.8	93.8	85.8	222.6	180.0	2.84	2.81	0.43	0.39
	0.4	82.5	83.4	146.0	138.2	145.9	127.0	1.85	1.79	0.23	0.07
	0.6	125.6	122.5	182.6	174.7	105.5	94.5	1.28	1.27	0.16	0.11
	0.8	169.3	165.6	213.6	206.4	76.8	71.1	0.91	0.88	0.10	0.09
	1.0	214.4	208.9	238.0	232.2	48.1	45.6	0.65	0.63	0.09	0.08

(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน)

ตารางที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เดคิโม้ประมาณ 4%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดการเป็น R-L

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาท์พุท						
	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$	
SPWM	0.23	0.87	1.13	0.88	1.13	3.45	2.97
	0.46	1.75	1.92	1.76	1.92	1.74	1.74
	0.69	2.76	2.73	2.76	2.74	1.47	1.45
	0.92	3.48	3.37	3.48	3.38	1.53	1.18
	1.15	4.13	4.00	4.14	4.00	1.27	0.99
HIPWM	0.2	0.88	1.13	0.88	1.13	3.39	2.86
	0.4	1.79	1.91	1.80	1.90	2.19	1.79
	0.6	2.77	2.73	2.77	2.73	1.66	1.45
	0.8	3.47	3.37	3.47	3.38	1.54	1.22
	1.0	4.28	4.07	4.17	4.07	1.31	0.95
SVPWM	0.2	0.88	1.13	0.89	0.63	3.53	4.1
	0.4	1.80	1.9	1.80	1.93	2.20	1.8
	0.6	2.76	2.72	2.76	2.73	1.78	1.4
	0.8	3.48	3.30	3.49	3.30	1.47	1.21
	1.0	4.27	4.10	4.21	4.10	1.30	0.91
DPWM120	0.2	1.02	1.17	1.03	1.17	8.86	10.84
	0.4	1.91	2.05	1.92	2.05	4.60	5.3
	0.6	2.88	2.85	2.89	2.85	3.40	3.5
	0.8	3.61	3.50	3.61	3.5	2.50	2.8
	1.0	4.30	4.23	4.30	4.23	1.70	1.7
GDPWM	0.2	1.05	1.07	1.05	1.07	3.30	3.1
	0.4	1.96	2.06	1.96	2.06	2.36	1.78
	0.6	2.74	2.79	2.74	2.79	1.69	1.66
	0.8	3.45	3.49	3.46	3.49	1.60	1.30
	1.0	4.31	4.15	4.31	4.15	0.95	0.91

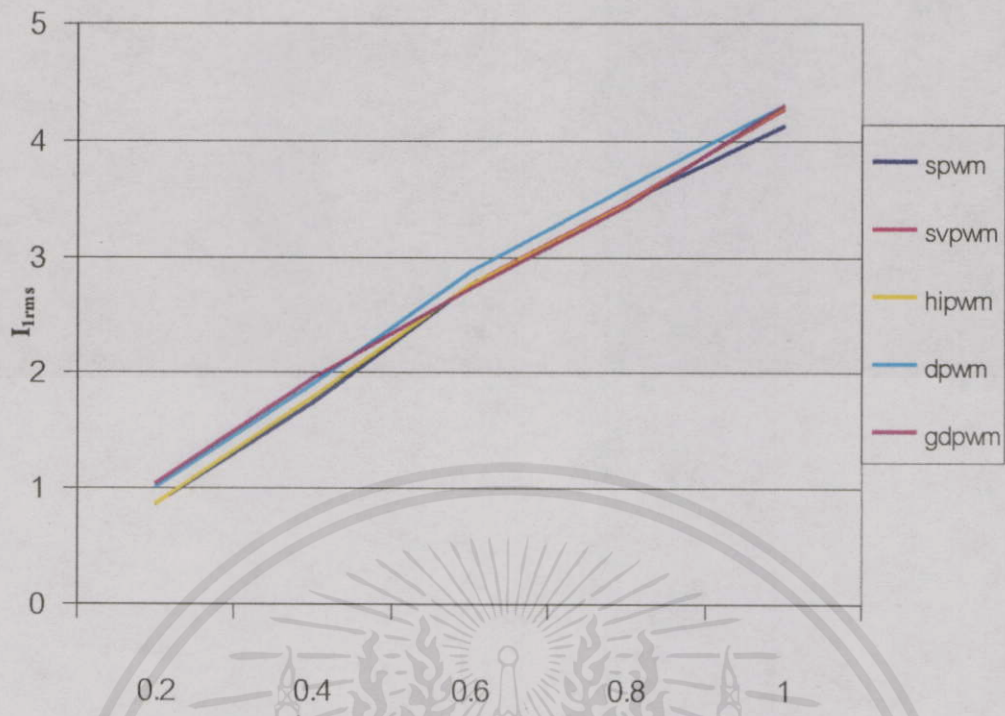
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

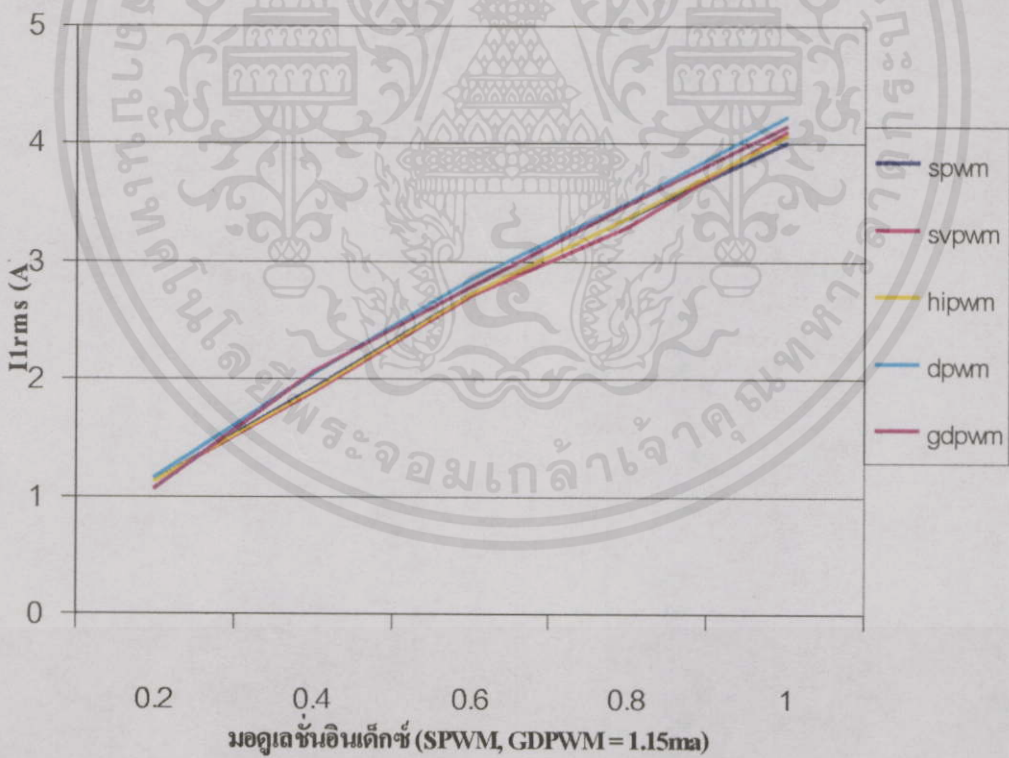
รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพื้นคาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>a</sub>)

(a)

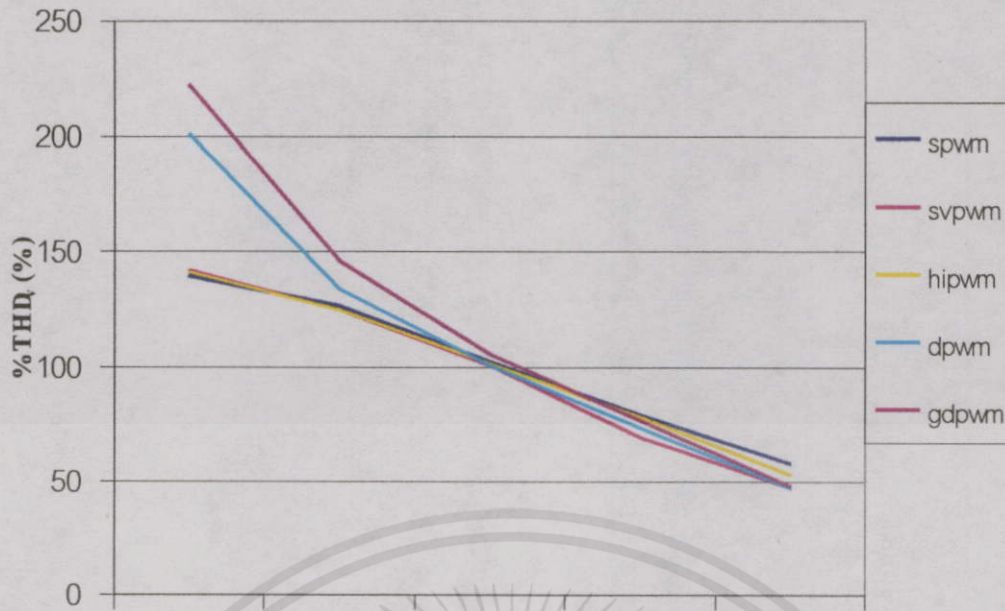


(b)

รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพื้นดามเมนทอลที่ได้

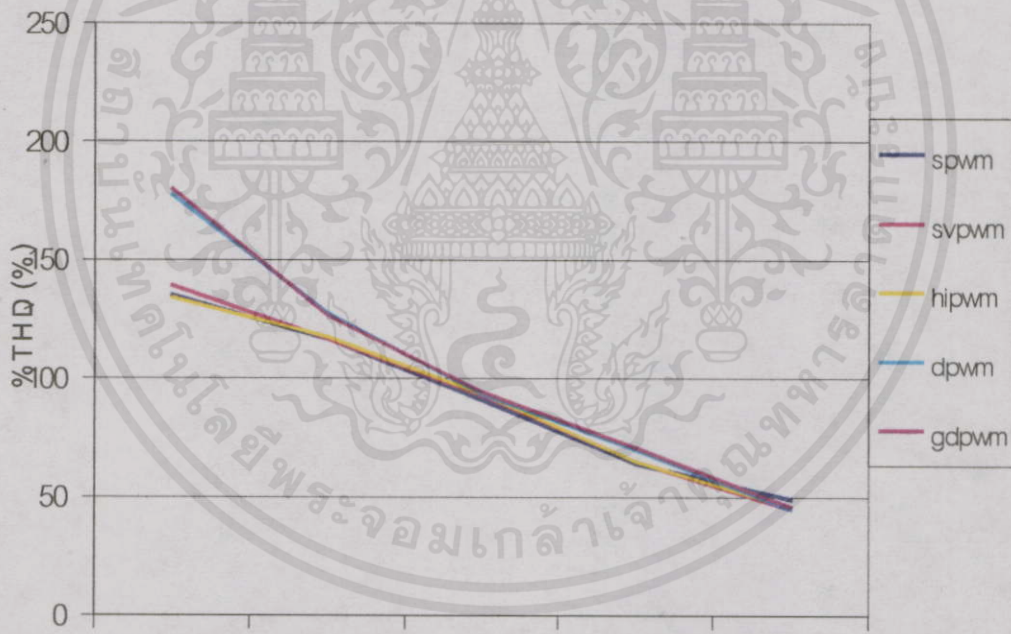
จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.10 (a) ผลการ

ทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM =  $1.15 \cdot m_a$ )

(a)



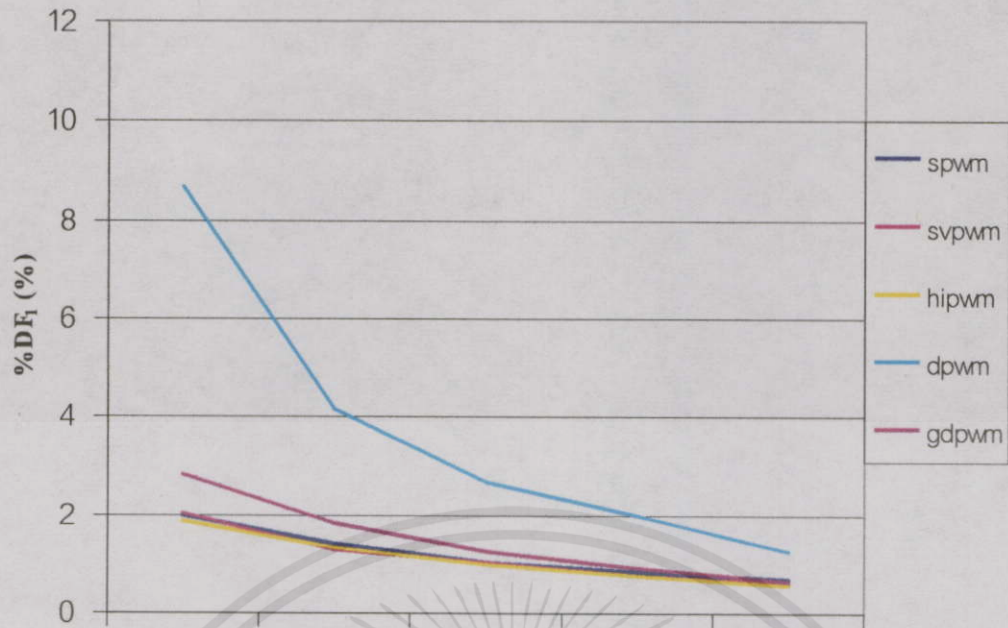
มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM =  $1.15 \cdot m_a$ )

(b)

รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ THD<sub>v</sub> ที่ได้จาก

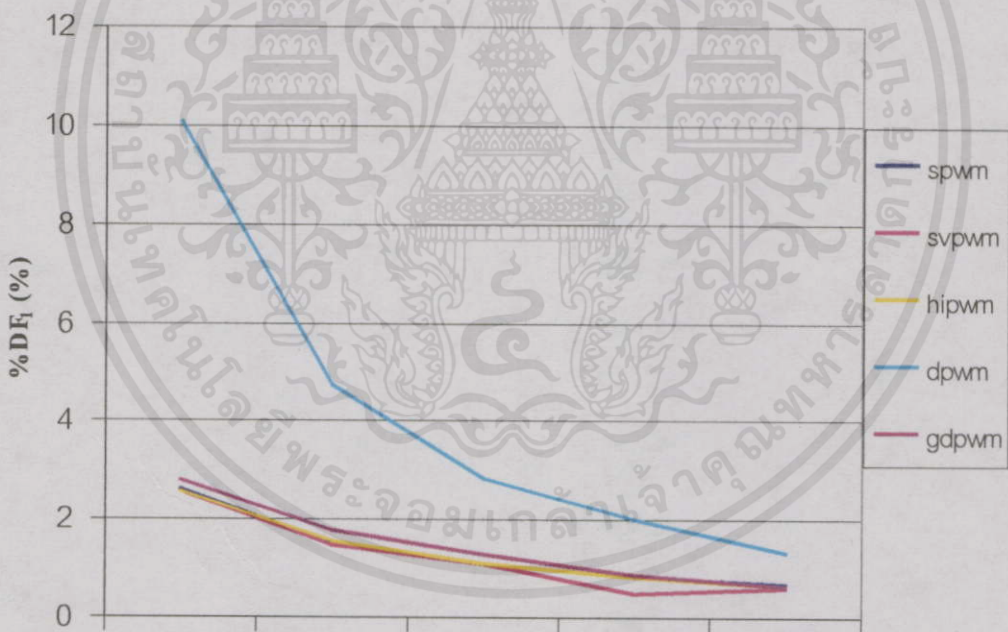
เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 (a) ผลการทดลอง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำขอสงวนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(a)



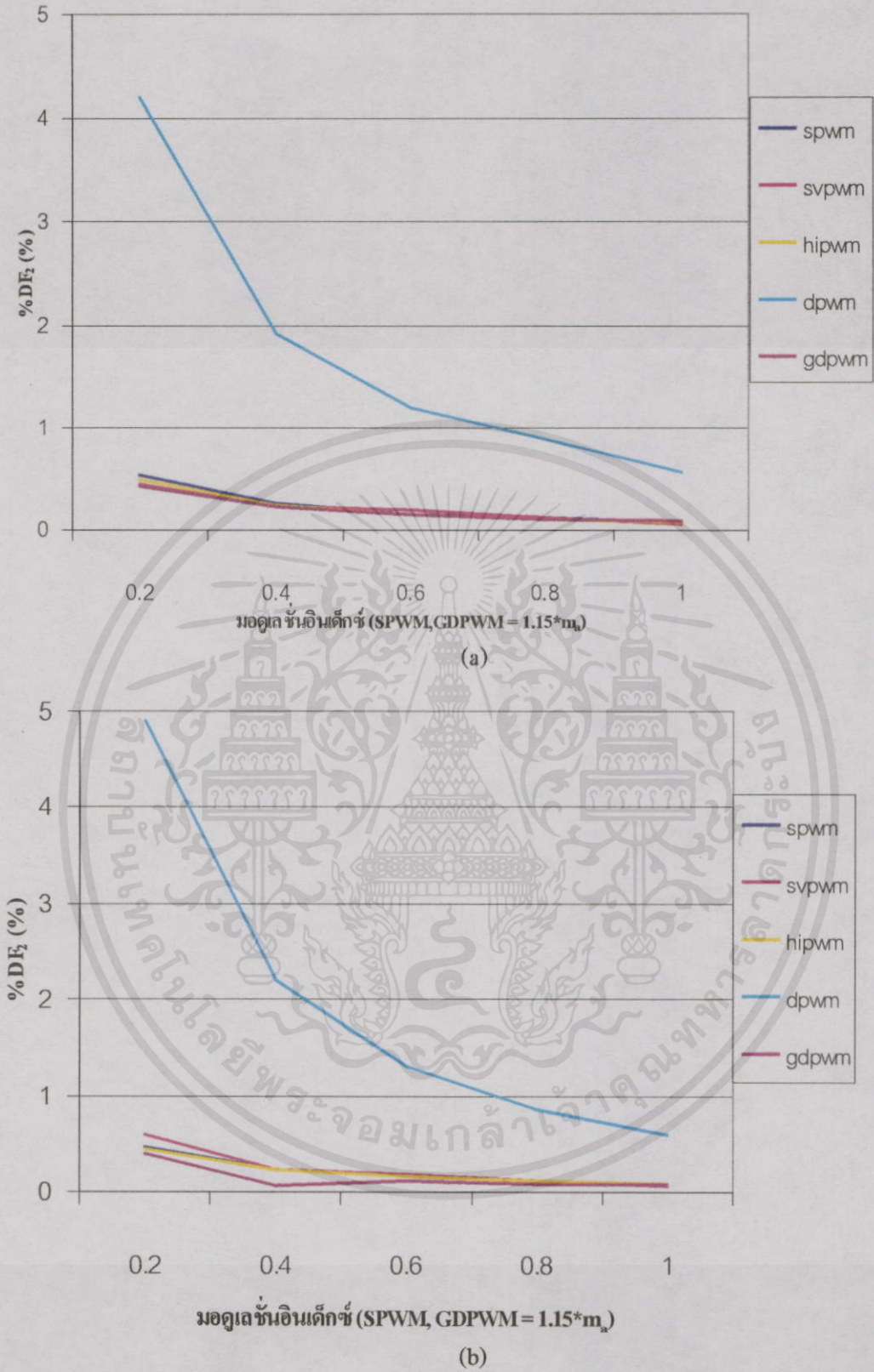
มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)

(b)

รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_1$  ที่ได้จาก

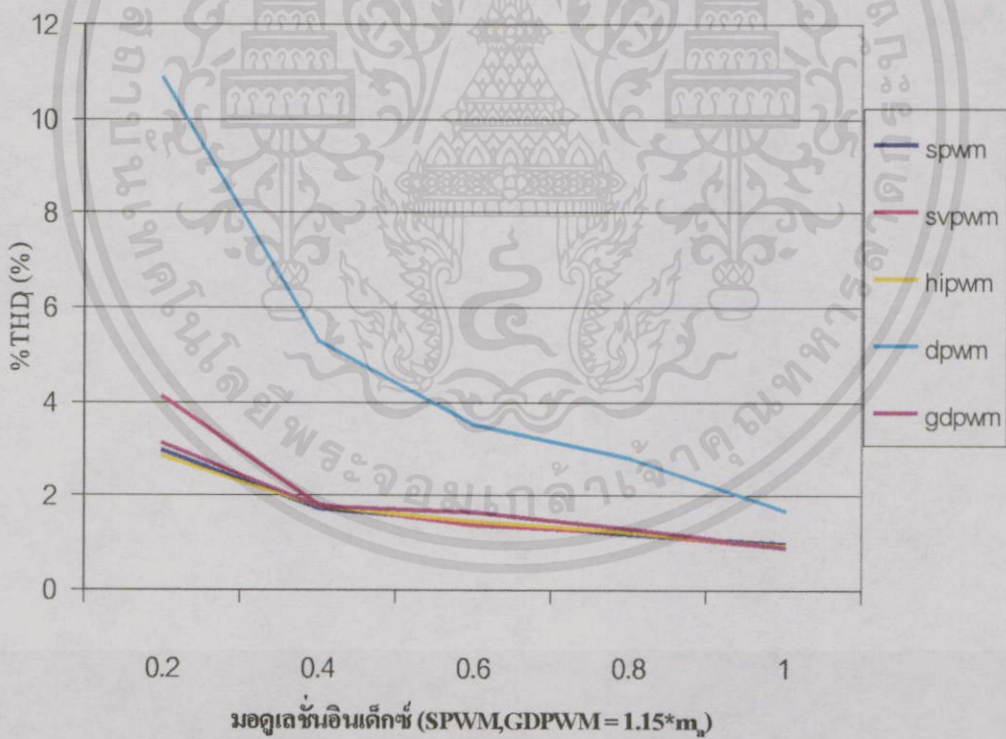
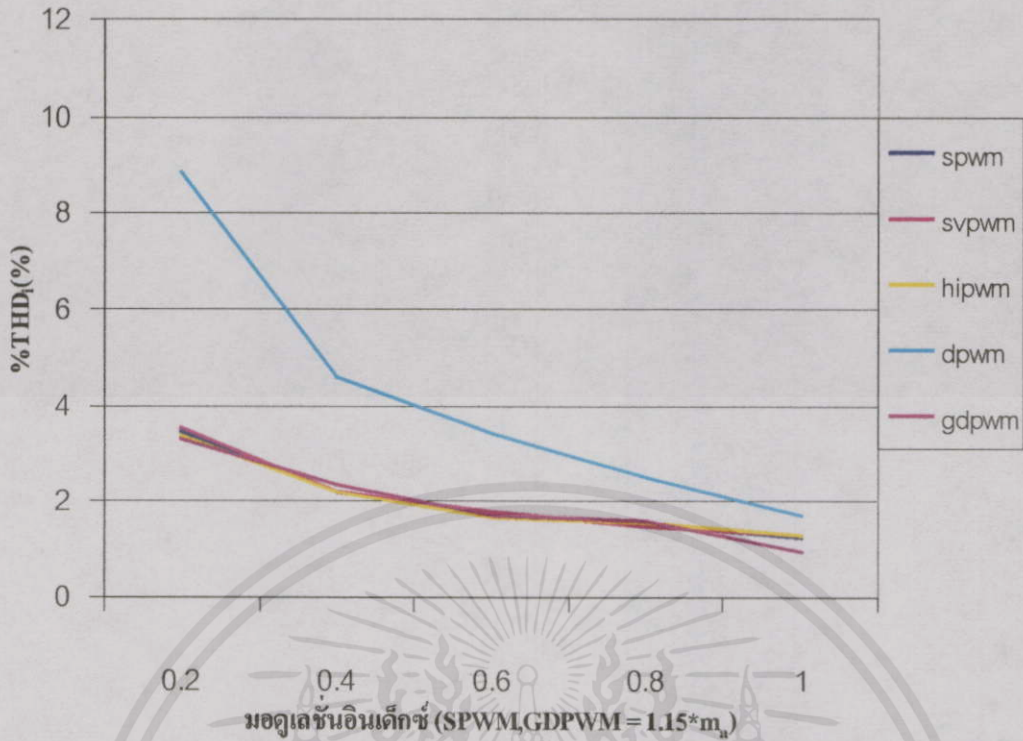
เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 (a) ผลการทดลอง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้เขียนไม่รับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) ผลจำลองการทำงาน



รูปที่ 5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_2$  ที่ได้จาก

เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.9 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



(b)

รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์  $THD_1$  ที่ได้จาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.10 (a) ผลการทดลอง ไม่ว่าจะถี่ใดทั้งสิ้น ออกทั้งหมดให้ลดเปลืองน้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.25-5.30 แสดงให้เห็นผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และได้ผลโดยรวมสรุปได้เช่นเดียวกับที่การต่อโหลดแบบ R-L ที่เค้ค้ใหม่ 2 % โดยค่าดัชนีความผิดเพี้ยนต่างๆที่ 4 % นี้จะสูงกว่าที่ 2 % โดยเฉพาะในย่านมอดูละชันอินเด็กซ์ต่ำๆ

ตารางที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูละชันอินเด็กซ์ เค้ค้ใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดภาระ เป็น L-L

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต										
	$V_{1rms}$	$V_{1rms}$	$V_{rms}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_1$	$DF_2$	$DF_2$	
SPWM	0.23	37.6	39.9	64.9	69.5	139.8	135.4	2.02	2.42	0.58	0.47
	0.46	82.8	85.9	131.6	135.4	123.5	110.5	1.27	1.42	0.28	0.22
	0.69	128.2	128.7	177.7	176.5	95.8	83.0	0.96	1.04	0.18	0.15
	0.92	173.8	171.7	206.7	205.0	64.6	58.7	0.73	0.83	0.10	0.11
	1.15	211.7	206.2	237.6	232.1	50.9	48.7	0.86	0.86	0.15	0.13
HIPWM	0.2	37.6	39.9	64.9	70.1	139.8	134.0	2.14	2.39	0.58	0.21
	0.4	82.8	85.9	131.0	135.2	123.5	111.4	1.17	1.40	0.28	0.14
	0.6	128.2	128.6	177.2	175.5	95.9	84.7	0.87	0.99	0.18	0.11
	0.8	173.8	171.9	206.9	204.0	64.6	59.3	0.69	0.79	0.10	0.10
	1.0	211.7	211.1	237.6	233.1	50.9	45.9	0.55	0.55	0.15	0.05
SVPWM	0.2	36.5	40.1	63.1	70.2	140.4	135.0	1.88	2.37	0.58	0.07
	0.4	83.6	86.4	131.7	135.8	126.5	110.0	1.24	1.41	0.23	0.22
	0.6	129.7	129.2	177.2	175.8	93.1	84.6	0.89	1.03	0.12	0.15
	0.8	174.6	172.4	207.2	204.4	63.9	59.4	0.69	0.50	0.11	0.11
	1.0	217.4	212.2	239.6	234.0	46.1	45.0	0.58	0.58	0.07	0.06
DPWM120	0.2	40.8	44.1	90.0	94.8	196.1	174.5	8.27	10.49	4.0	5.0
	0.4	86.5	87.4	142.9	143.4	130.4	122.6	4.8	5.2	2.26	2.43
	0.6	131.6	130.5	183.1	181.1	96.7	91.3	3.24	3.31	1.5	1.50
	0.8	177.7	174.1	216.5	212.6	69.0	66.0	2.59	2.63	1.2	1.23
	1.0	222.2	216.6	245.2	240.5	46.5	44.9	1.56	1.49	0.72	0.68
GDPWM	0.2	37.7	37.8	85.7	85.8	203.4	180.0	2.69	2.81	0.45	0.39
	0.4	82.6	79.3	137.9	132.9	133.5	131.4	1.83	1.79	0.25	0.19
	0.6	126.9	122.5	179.4	174.6	99.8	100.7	1.28	1.27	0.18	0.12
	0.8	172.4	165.6	213.2	206.4	72.7	71.1	0.90	0.88	0.11	0.08
	1.0	217.9	208.9	241.3	232.1	47.4	45.6	0.64	0.63	0.09	0.08

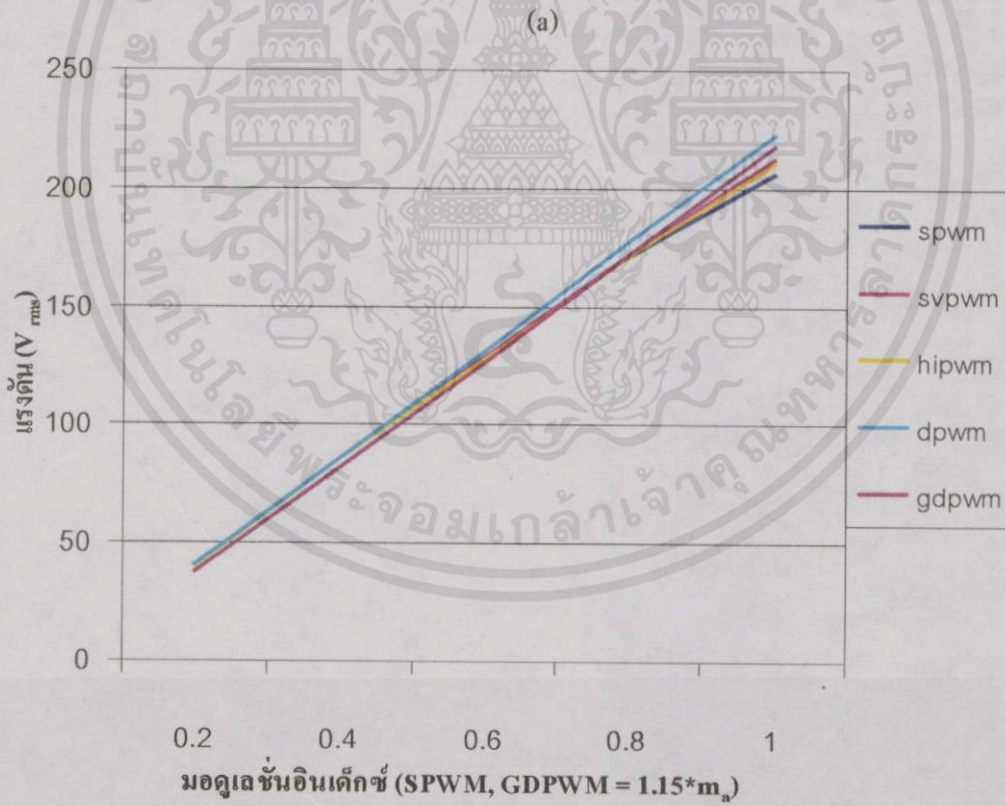
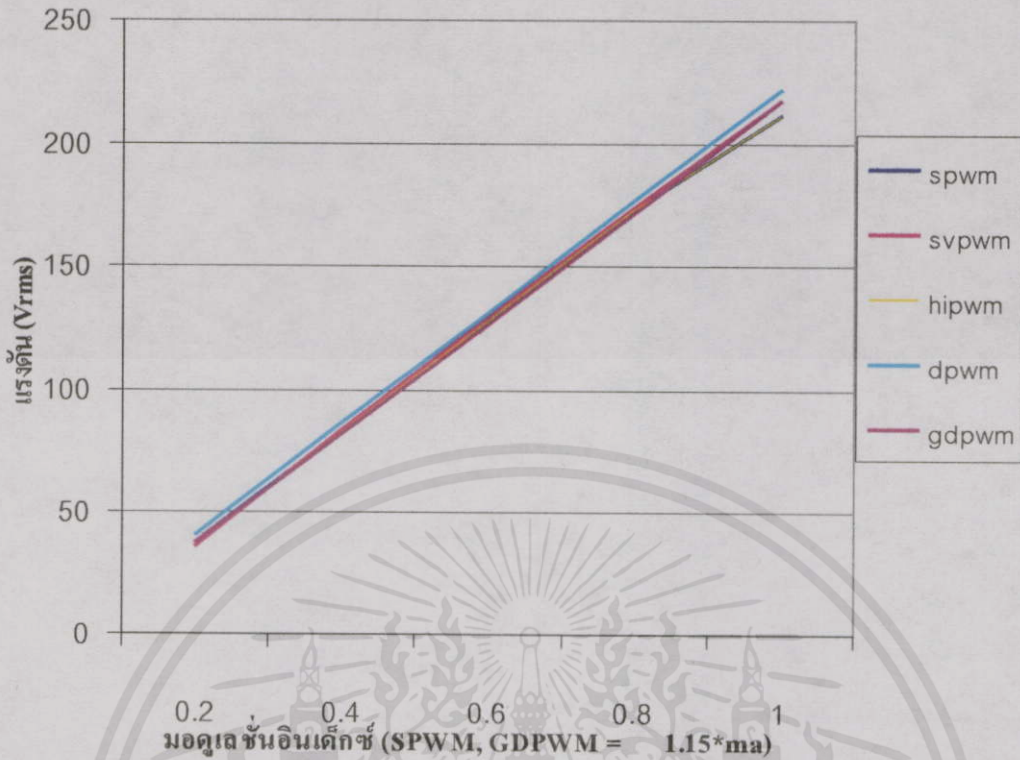
เอกสาร (ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน) ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ เคนด์โทม์ประมาณ 4%ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดภาระเป็น L-L

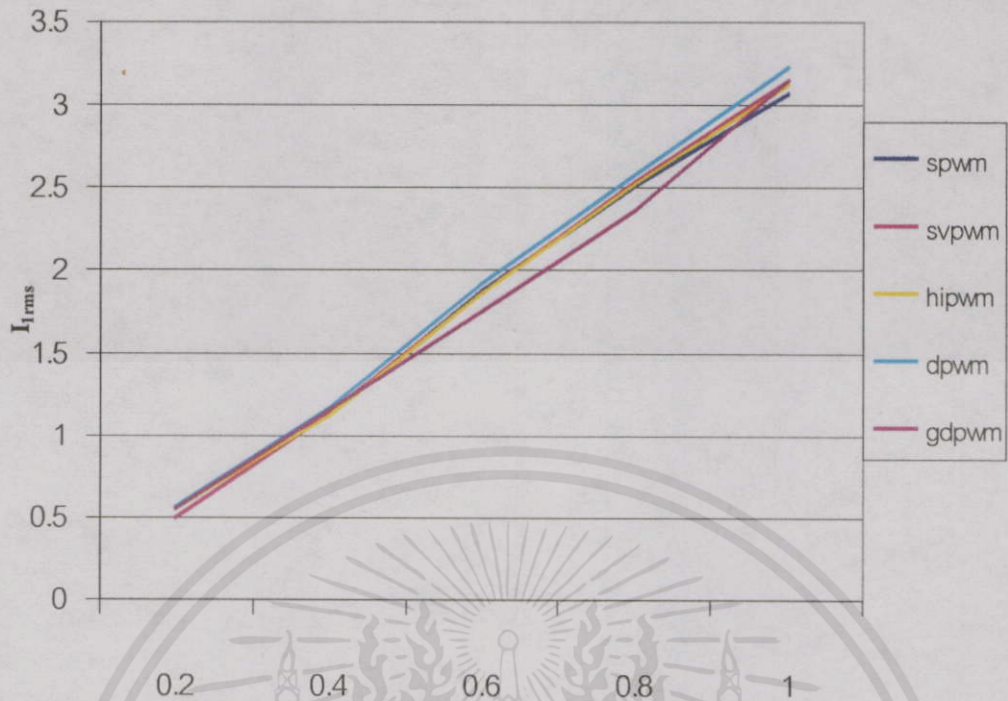
เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาท์พุท						
	$I_{1rms}$	$I_{1rms}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$	
SPWM	0.23	0.55	0.66	0.55	0.66	3.46	2.95
	0.46	1.12	1.23	1.12	1.28	2.35	1.45
	0.69	1.88	1.89	1.88	1.89	1.66	1.05
	0.92	2.52	2.46	2.52	2.46	1.13	0.86
	1.15	3.07	2.96	3.07	2.96	1.26	0.88
HIPWM	0.2	0.55	0.67	0.56	0.67	2.69	2.87
	0.4	1.12	1.23	1.12	1.23	2.28	1.44
	0.6	1.87	1.89	1.87	1.89	1.58	1.03
	0.8	2.53	2.47	2.53	2.47	1.09	0.80
	1.0	3.13	3.04	3.13	3.04	1.07	0.57
SVPWM	0.2	0.50	0.67	0.51	0.69	3.7	2.75
	0.4	1.13	1.24	1.13	1.24	2.48	1.50
	0.6	1.87	1.89	1.87	1.89	1.75	1.04
	0.8	2.54	2.47	2.54	2.47	1.10	0.79
	1.0	3.15	3.06	3.15	3.06	1.01	0.59
DPWM120	0.2	0.57	0.65	0.57	0.66	9.69	10.30
	0.4	1.17	1.25	1.17	1.26	5.50	5.08
	0.6	1.92	1.92	1.92	1.92	3.56	3.45
	0.8	2.58	2.51	2.58	2.51	2.50	2.64
	1.0	3.23	3.13	3.23	3.13	1.73	1.50
GDPWM	0.2	0.56	0.63	0.56	0.63	4.45	3.10
	0.4	1.15	1.15	1.15	1.15	2.14	1.82
	0.6	1.76	1.80	1.76	1.80	1.51	1.30
	0.8	2.37	2.37	2.37	2.37	1.31	0.91
	1.0	3.15	2.99	3.15	2.99	1.02	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

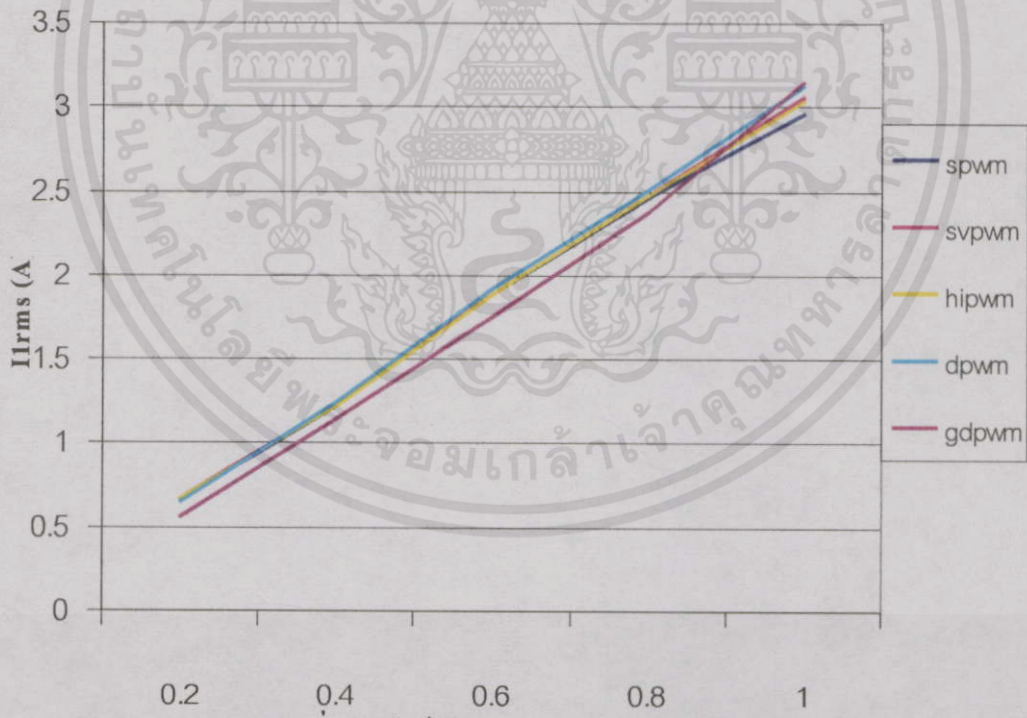


(b)

รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันฟันทนคาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตซ์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน

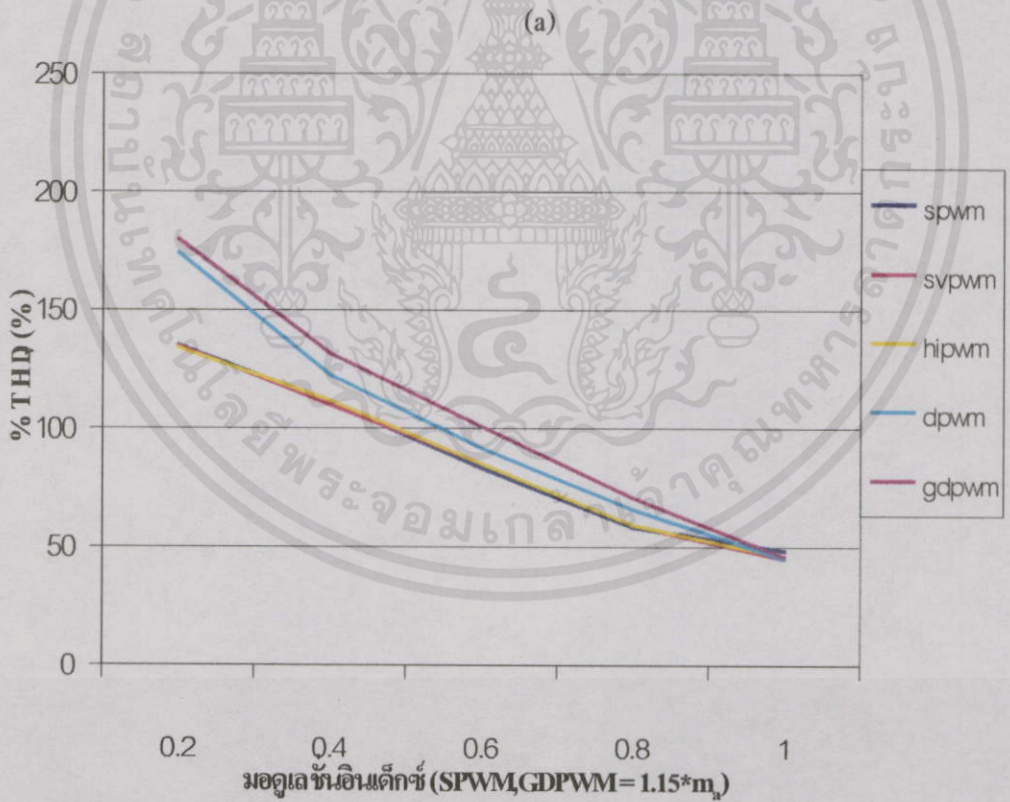
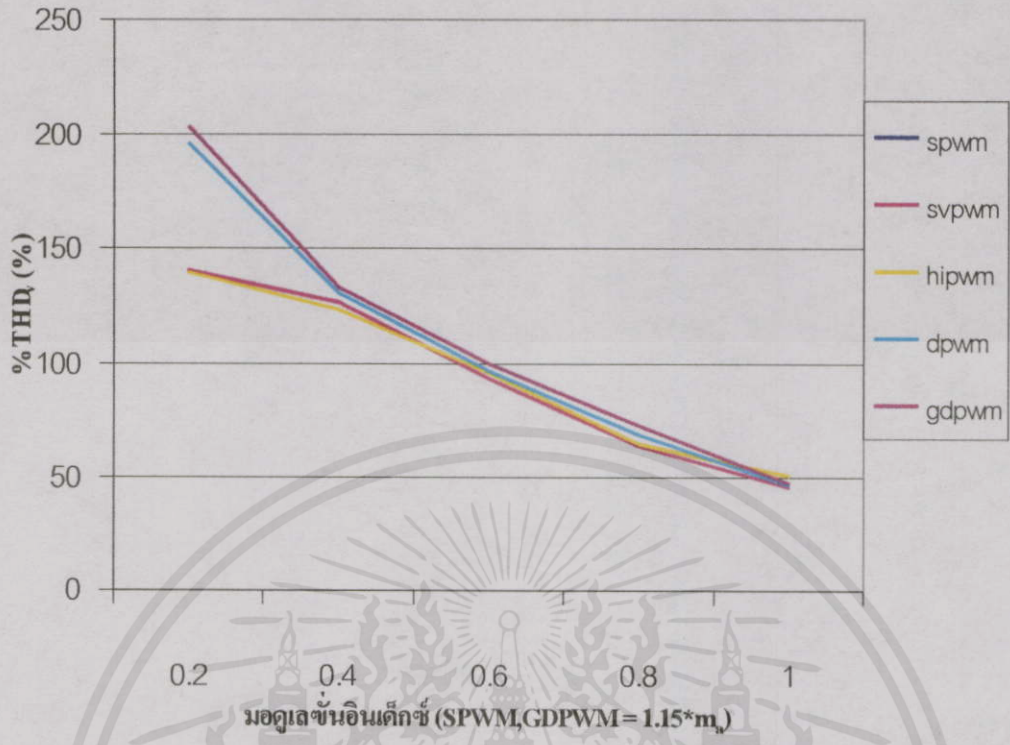


มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>i</sub>)  
(a)

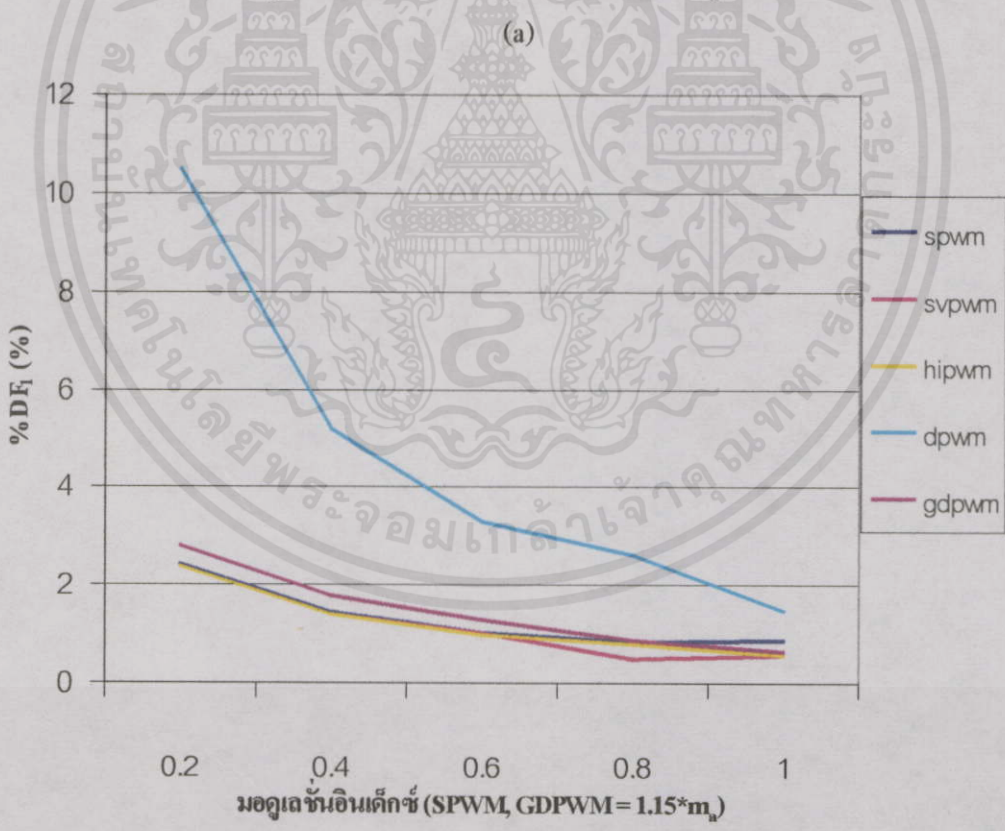
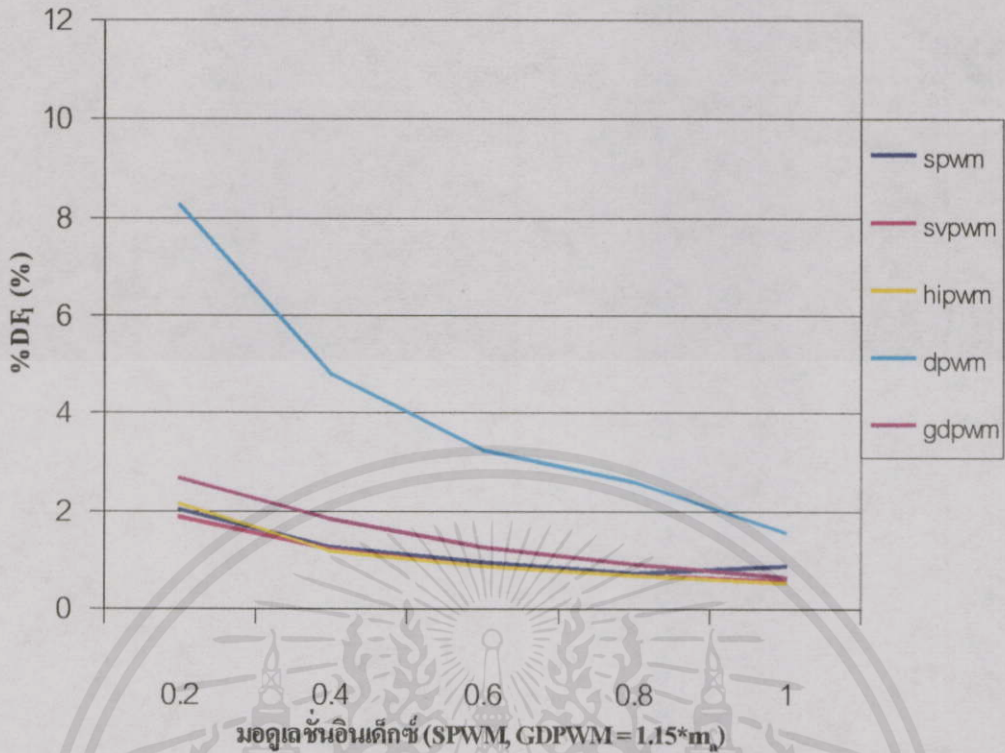


มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15m<sub>a</sub>)  
(b)

รูปที่ 5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสฟลักซ์คานาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.12 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน

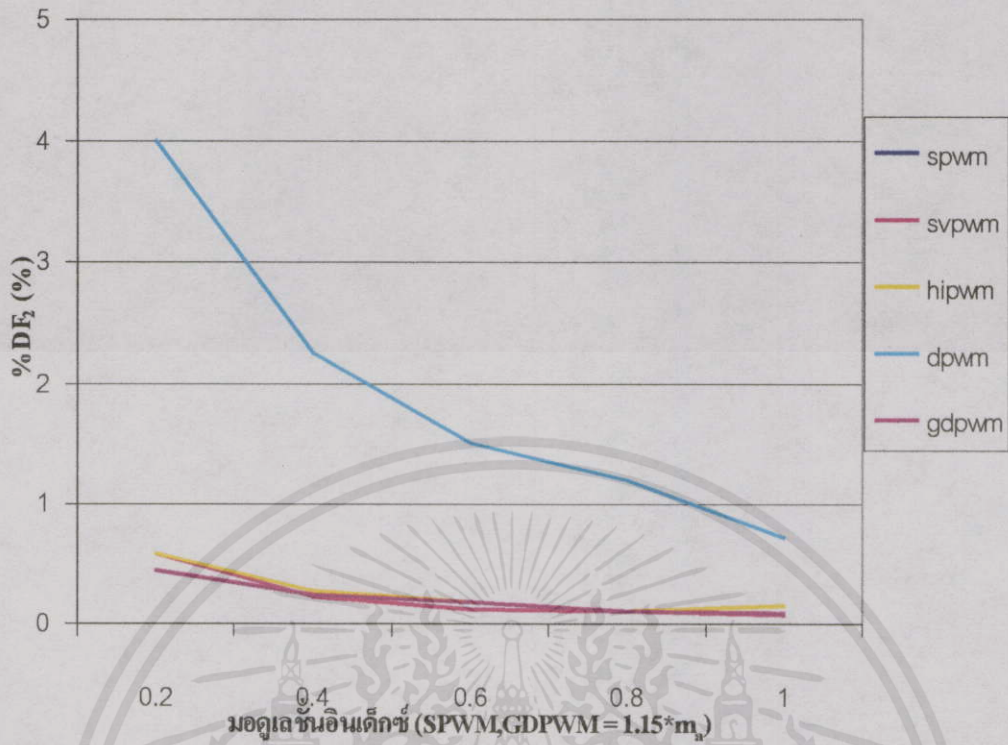


รูปที่ 5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์ THD ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน

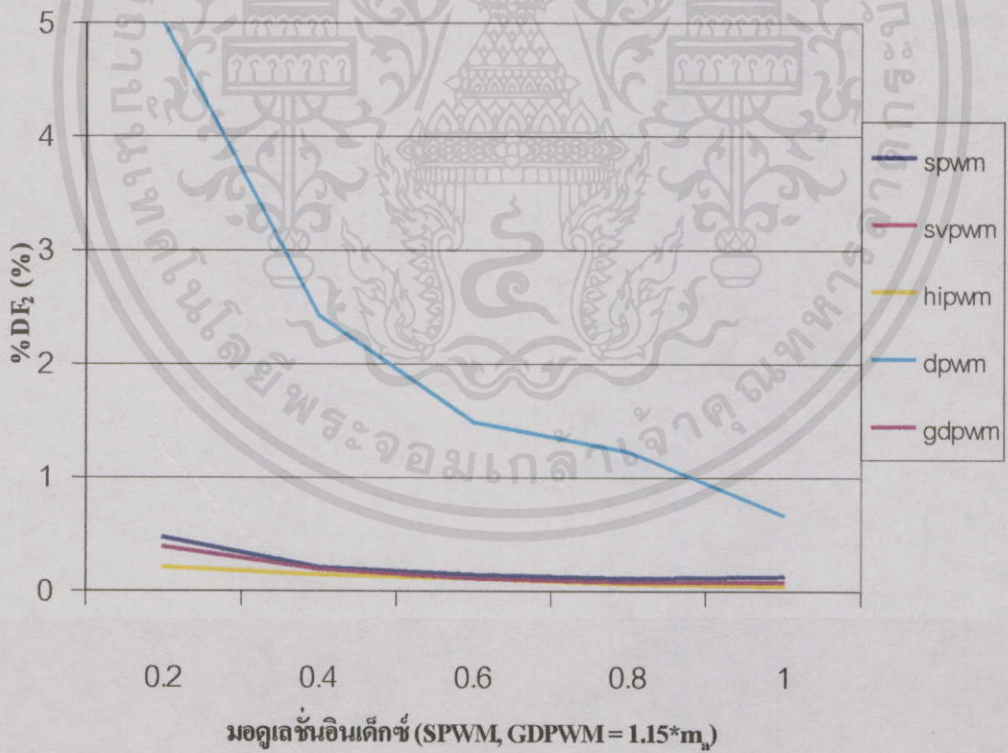


(b)

รูปที่ 5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซนต์  $DF_1$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.11 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน

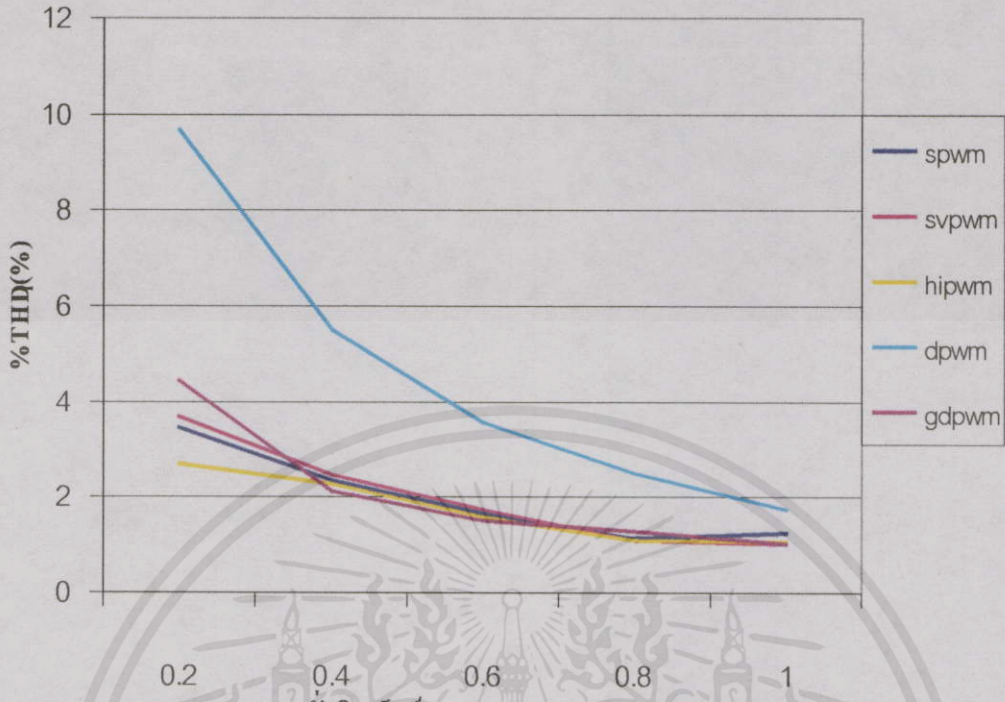


(a)

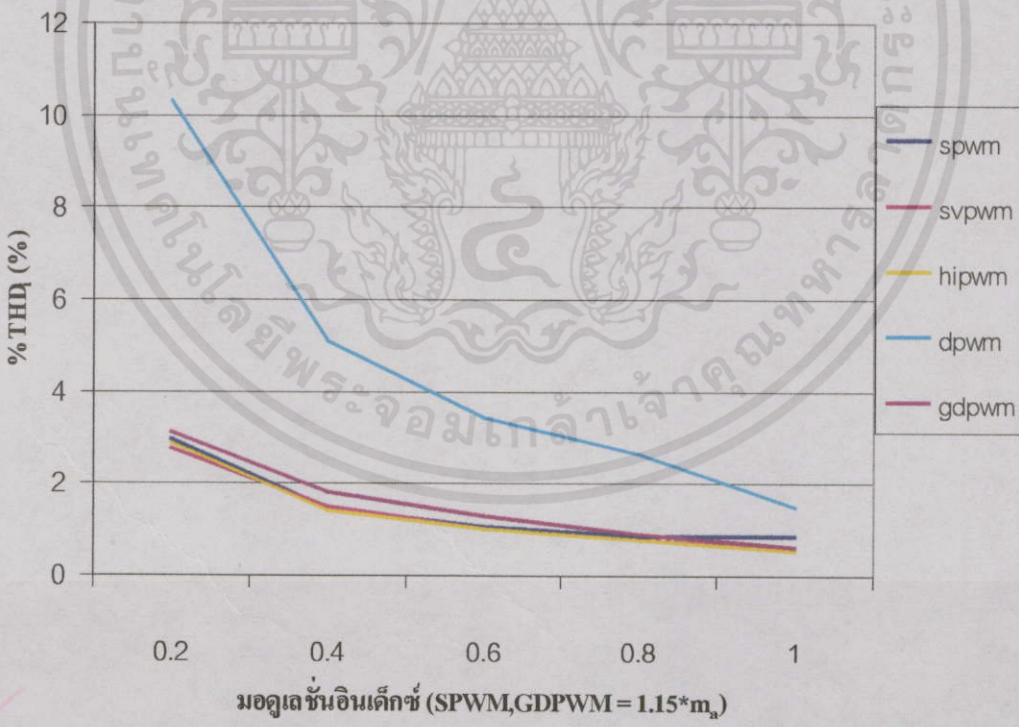


(b)

รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์  $DF_2$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เปรียบเทียบกับตารางที่ 5.11 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)  
(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>n</sub>)  
(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 5.36** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ THD<sub>i</sub> ที่ได้จาก  
 ไม่ว่าจะคิดค่าทางสน ออกทางหม้อให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.12 (a) ผลการทดลอง  
 (b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.31-5.36 แสดงให้เห็นผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และได้ผลโดยรวมสรุปได้เช่นเดียวกับที่การต่อโหลดแบบ L-L ที่เค็ดใหม่ 2 % โดยค่าดัชนีความผิดเพี้ยนต่างๆที่ 4 % นี้จะสูงกว่าที่ 2 % โดยเฉพาะในย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำๆ สำหรับค่า  $I_{rms}$  ของเทคนิคแบบ GDPWM ในช่วงมอดูเลชันอินเด็กซ์ตั้งแต่ 0.2-0.8 จะให้ค่าต่ำกว่าเทคนิคอื่นเล็กน้อย ทั้งนี้จะมาจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณในโหลดแบบ L-L และเค็ดใหม่ที่มีค่าถึง 4 %

ตารางที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้ากับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เค็ดใหม่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ โหลดภาระ เป็น R

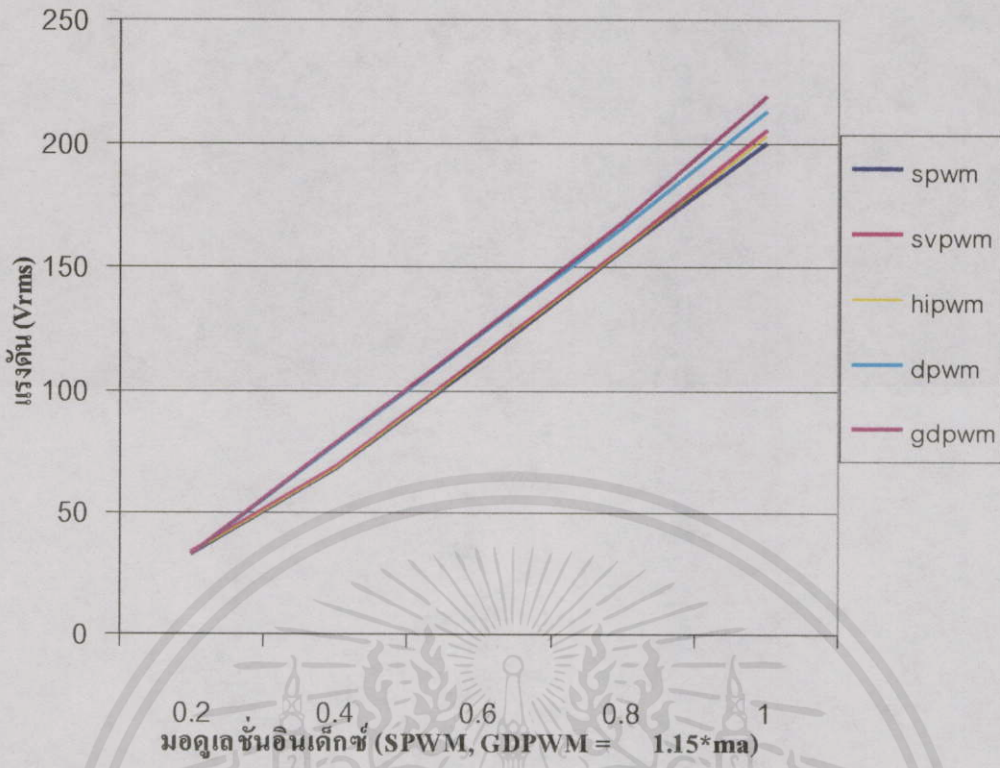
เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุต										
	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$THD_v$	$THD_v^*$	$DF_1$	$DF_1^*$	$DF_2$	$DF_2^*$	
SPWM	0.23	33.6	43.5	50.8	74.1	140.5	133.1	1.33	0.91	0.36	0.11
	0.46	68.0	87.3	110.9	137.4	128.6	110.4	1.11	0.77	0.18	0.05
	0.69	112.1	131.0	161.5	178.0	103.6	82.0	1.00	0.66	0.18	0.03
	0.92	157.4	174.4	193.1	206.5	171.0	57.0	0.78	0.59	0.13	0.02
	1.15	199.8	206.2	226.3	231.2	53.0	48.5	0.77	0.82	0.13	0.12
HIPWM	0.2	33.3	43.6	50.3	74.1	139.4	133.8	1.24	0.86	0.30	0.07
	0.4	68.0	87.3	109.4	136.3	125.7	112.6	1.22	0.75	0.19	0.06
	0.6	112.5	130.9	160.8	177.9	102.1	83.5	0.91	0.61	0.12	0.02
	0.8	157.4	174.7	192.9	204.5	70.8	56.1	0.71	0.51	0.10	0.03
	1.0	203.0	218.3	223.7	239.1	46.1	43.2	0.64	0.49	0.09	0.03
SVPWM	0.2	33.7	43.85	50.6	74.1	138.1	134.0	1.22	0.88	0.20	0.09
	0.4	68.5	87.8	109.8	136.7	125.8	112.5	1.11	0.75	0.16	0.05
	0.6	113.3	131.5	161.7	178.3	101.7	86	0.88	0.62	0.15	0.04
	0.8	157.8	175.2	193.2	204.7	70.4	55.9	0.69	0.82	0.12	0.02
	1.0	205.1	219.1	225.4	239.2	45.4	43.7	0.66	0.48	0.09	0.02
DPWM120	0.2	33.3	43.7	77.2	94.2	209.0	173.4	5.47	1.82	2.05	0.05
	0.4	77.9	87.6	131.3	142.9	135.6	121.8	3.00	1.41	1.24	0.06
	0.6	122.6	131.6	173.8	181.8	100.5	90.2	2.16	1.03	0.89	0.03
	0.8	166.5	175.5	205.8	213.6	72.6	65.3	1.47	0.69	0.60	0.02
	1.0	213.3	219.4	235.3	240.6	46.4	43.3	1.14	0.49	0.48	0.02
GDPWM	0.2	33.5	43.9	77.5	94.0	207.3	172.0	2.22	1.82	0.32	0.04
	0.4	78.7	87.4	132.3	142.5	134.9	128.7	1.42	1.42	0.15	0.03
	0.6	122.8	131.0	174.0	181.3	100.4	90.3	1.19	1.03	0.14	0.02
	0.8	168.3	174.6	207.7	212.8	72.3	69.7	0.82	0.69	0.09	0.02
	1.0	218.9	218.2	241.9	239.4	43.5	43.5	1.29	0.49	0.04	0.01

(ไม่มี \* หมายถึง เป็นผลจากการวัด, มี \* หมายถึง เป็นผลที่ได้จากการจำลองผลการทำงาน)

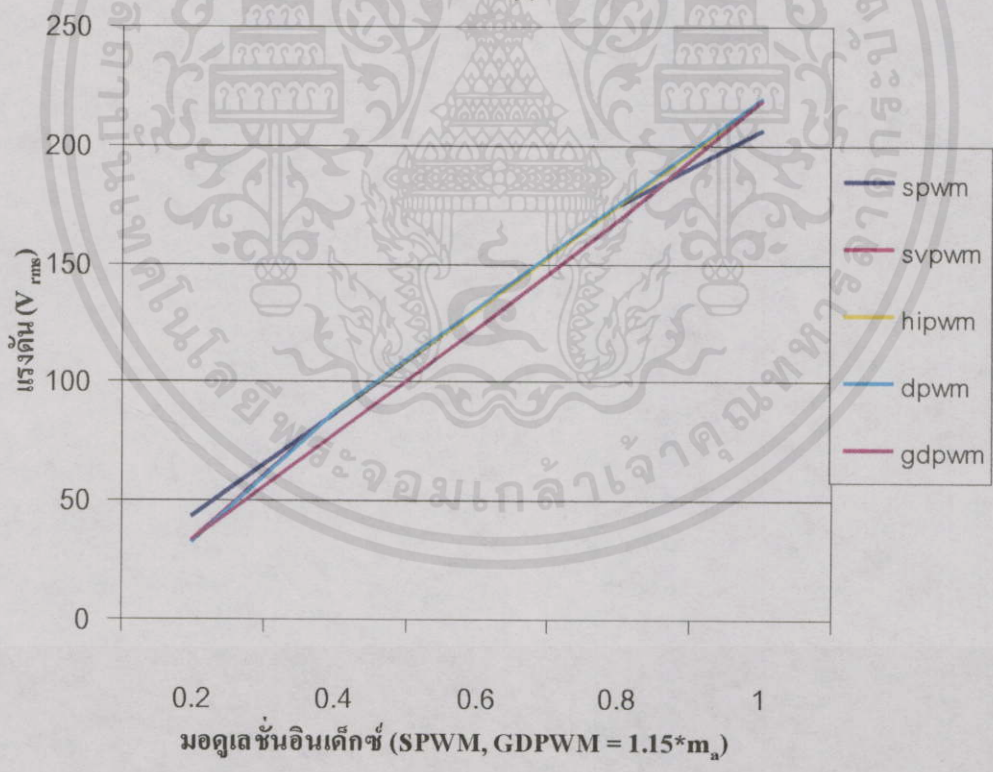
ตารางที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เคดีโคมี่ประมาณ 4% ของความถี่การสวิตช์ ที่โหลดภาระเป็น R

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาต์พุท						
	$I_{1rms}$	$I_{1rms}$	$I_{rms}$	$I_{rms}$	$THD_i$	$THD_i$	
SPWM	0.23	0.81	1.32	1.35	1.42	133.0	137.8
	0.46	1.78	2.16	2.87	3.37	127.0	121.6
	0.69	2.61	2.91	3.72	4.16	102.7	92.2
	0.92	3.37	3.54	4.15	4.40	71.8	63.3
	1.15	4.10	4.14	4.65	4.78	54.0	51.5
HIPWM	0.2	0.81	1.34	1.34	1.74	133.1	137.0
	0.4	1.78	2.16	2.85	3.74	124.9	120.5
	0.6	2.62	2.92	3.73	4.17	101.7	92.1
	0.8	3.38	3.54	4.14	4.41	71.8	60.8
	1.0	4.17	4.40	4.6	4.90	54.0	44.7
SVPWM	0.2	0.82	1.32	1.34	1.75	133.1	136.2
	0.4	1.80	2.17	2.86	3.74	124.9	119.4
	0.6	2.60	2.93	3.71	4.09	101.7	91.6
	0.8	3.39	3.55	4.15	4.42	71.2	60.53
	1.0	4.19	4.40	4.60	4.91	59.2	43.7
DPWM120	0.2	1.01	1.32	2.3	3.21	203.9	190.9
	0.4	1.96	2.16	1.33	3.79	137.0	128.0
	0.6	2.79	2.90	3.96	4.2	100.8	95.3
	0.8	3.54	3.56	4.39	4.44	73.2	69.5
	1.0	4.33	4.40	4.80	4.90	47.2	45.2
GDPWM	0.2	0.98	1.22	2.21	2.95	203.8	189.0
	0.4	1.95	2.16	3.27	3.78	134.7	128.7
	0.6	2.76	2.91	3.92	4.19	100.7	95.5
	0.8	3.54	3.55	4.39	4.43	73.0	69.7
	1.0	4.70	4.50	5.30	5.04	48.0	45.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

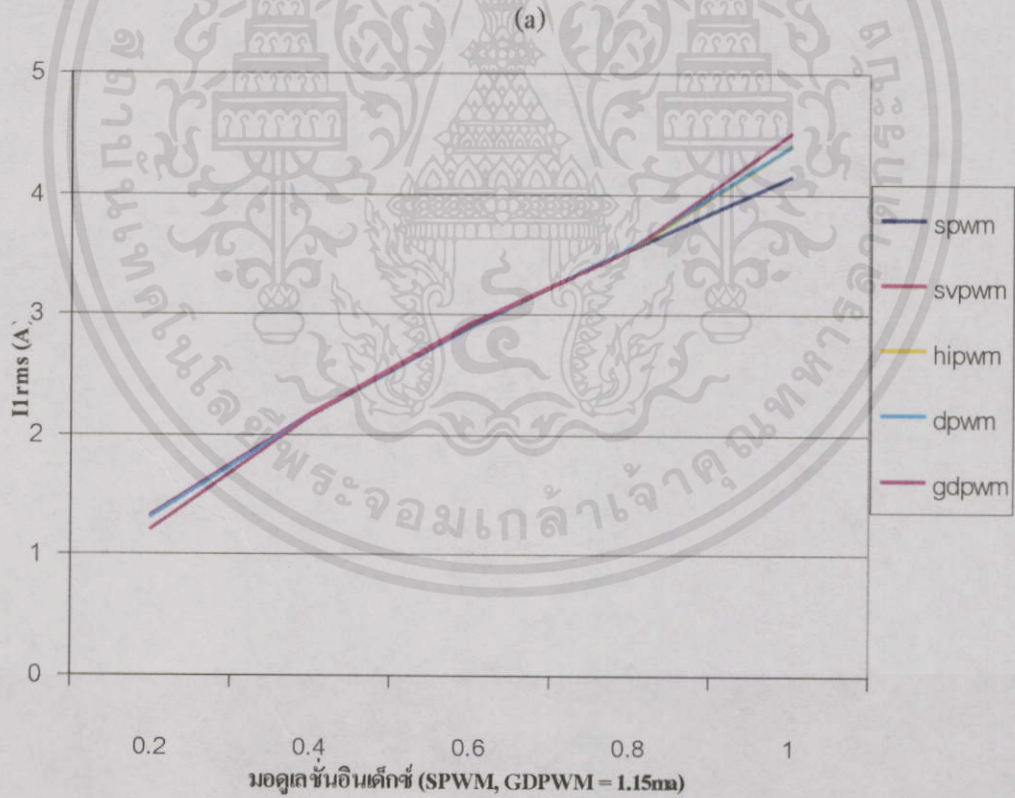
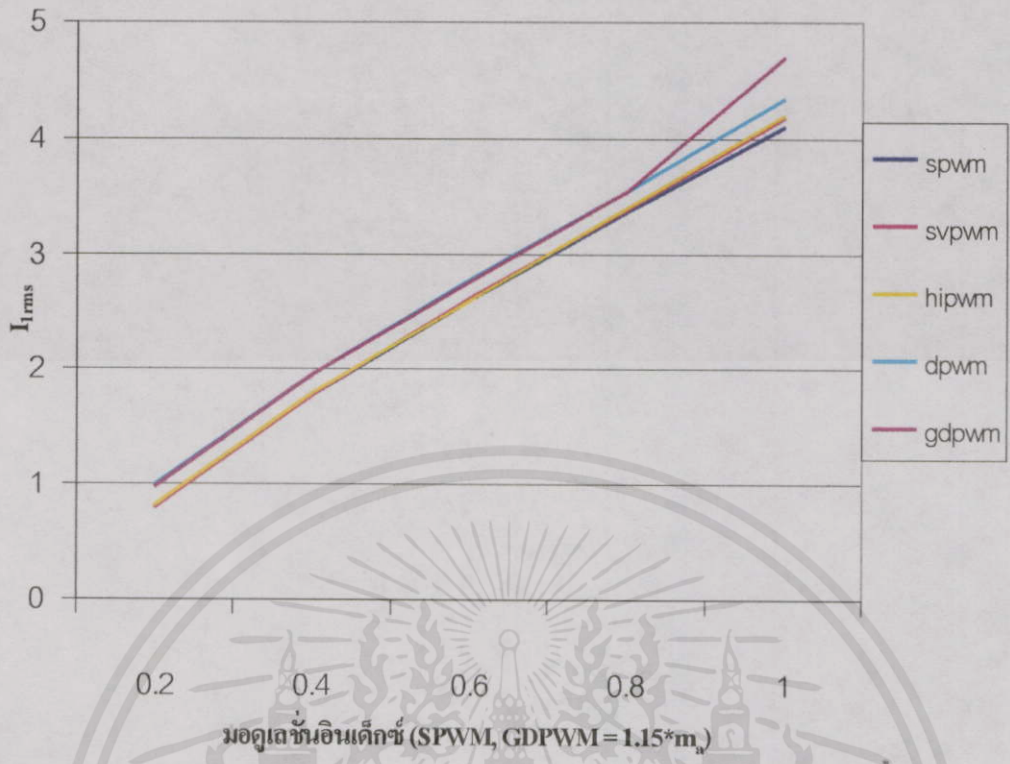


(a)



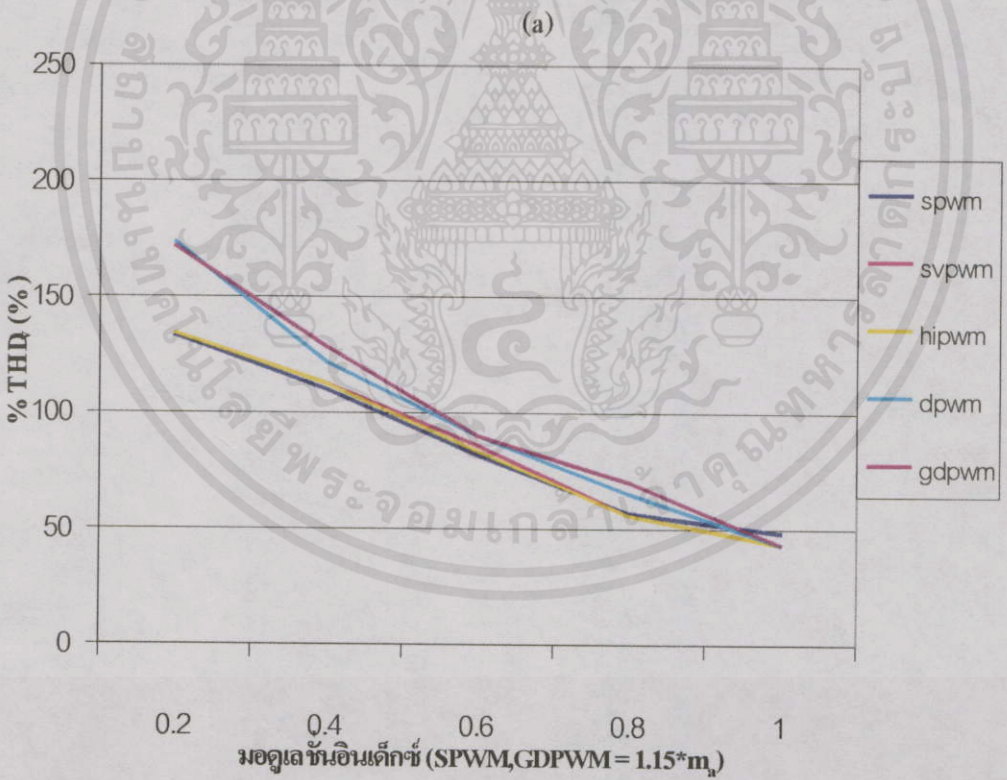
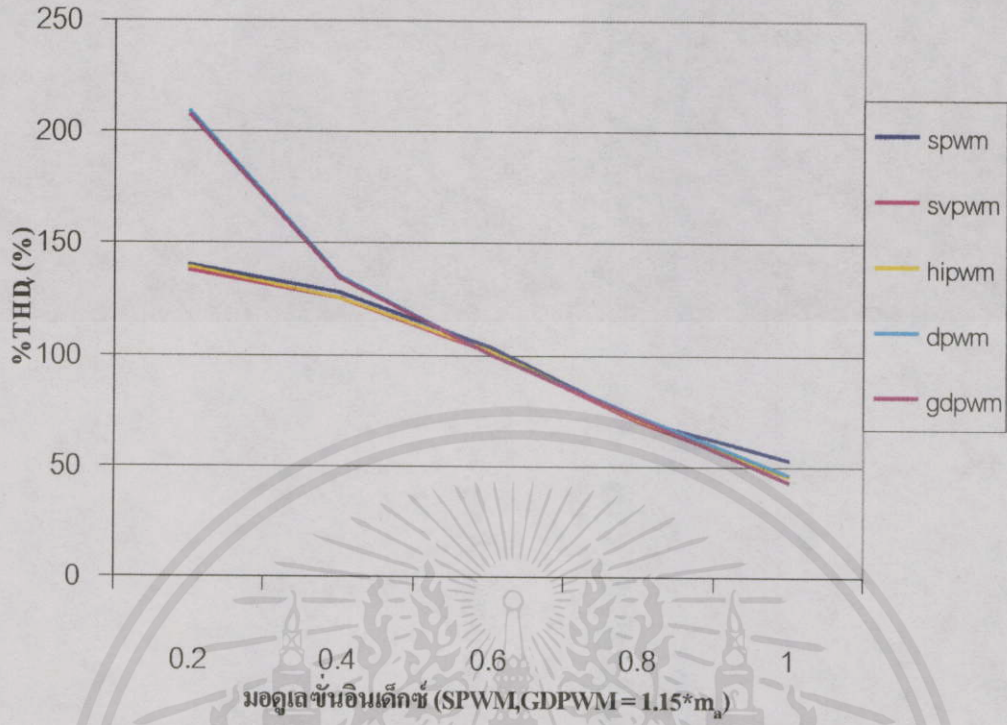
(b)

รูปที่ 5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดแรงดันพินดามเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



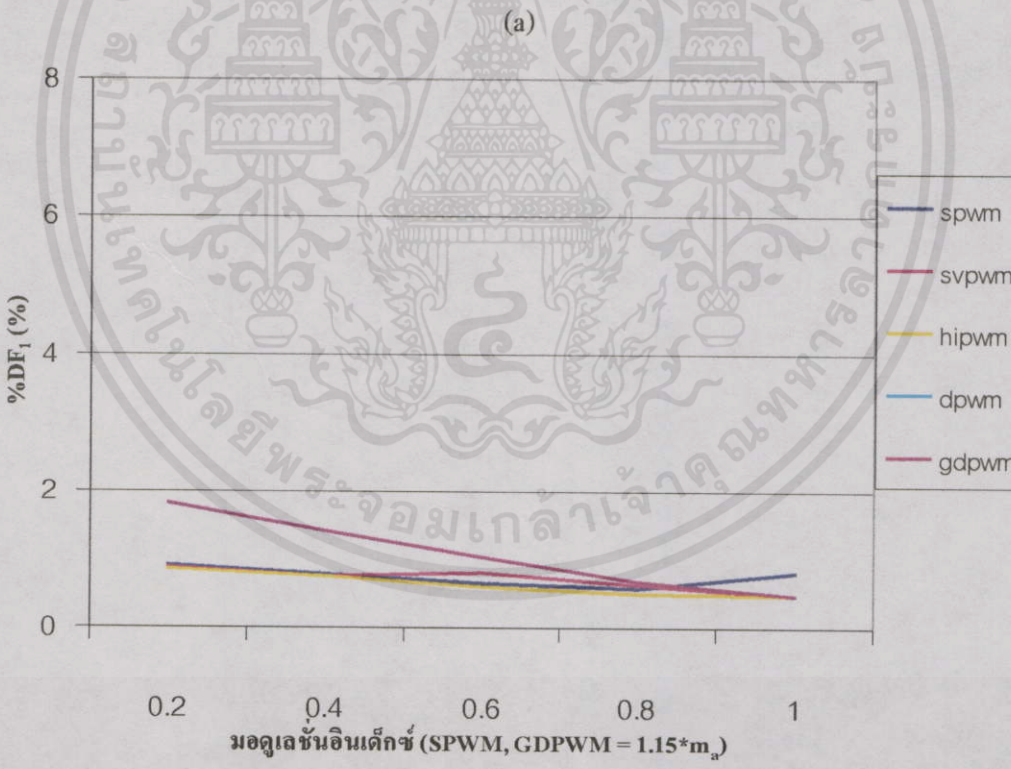
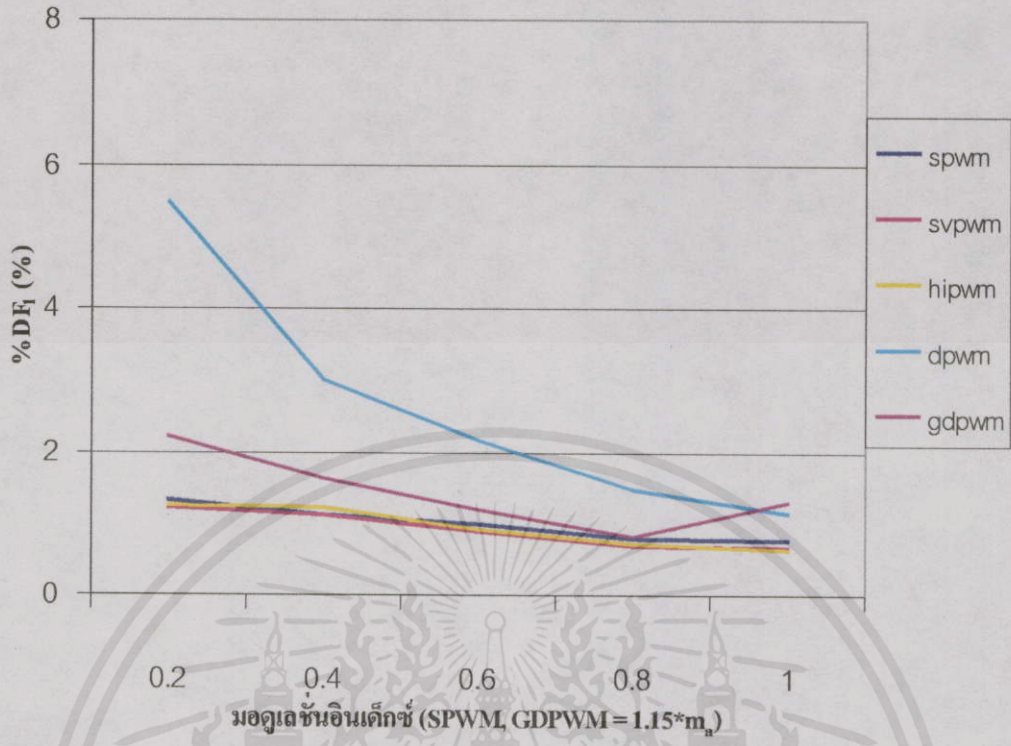
(b)

รูปที่ 5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับขนาดกระแสพื้นคานาเมนทอลที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.14 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



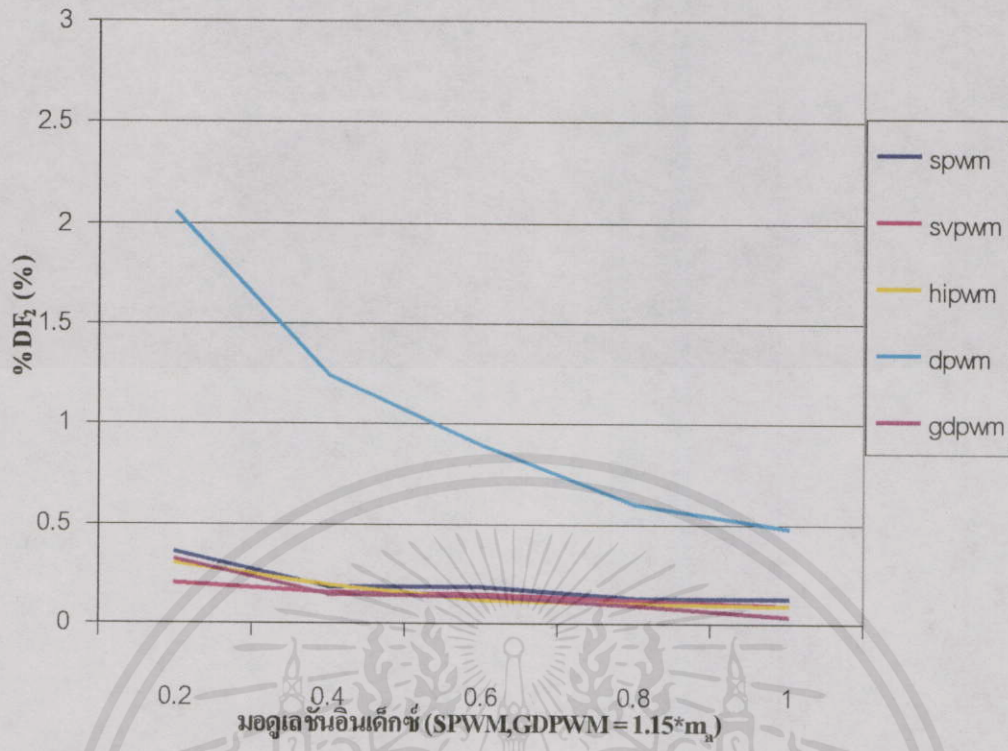
(b)

รูปที่ 5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์  $THD_v$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



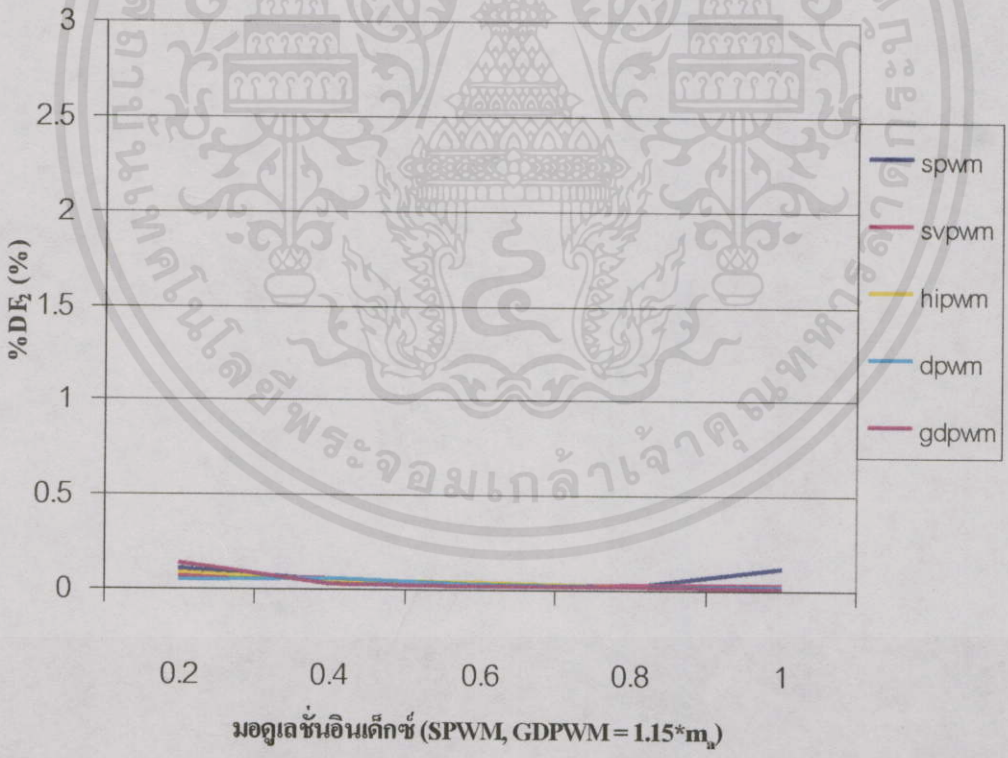
(b)

รูปที่ 5.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์  $DF_1$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูละชั้นอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>n</sub>)

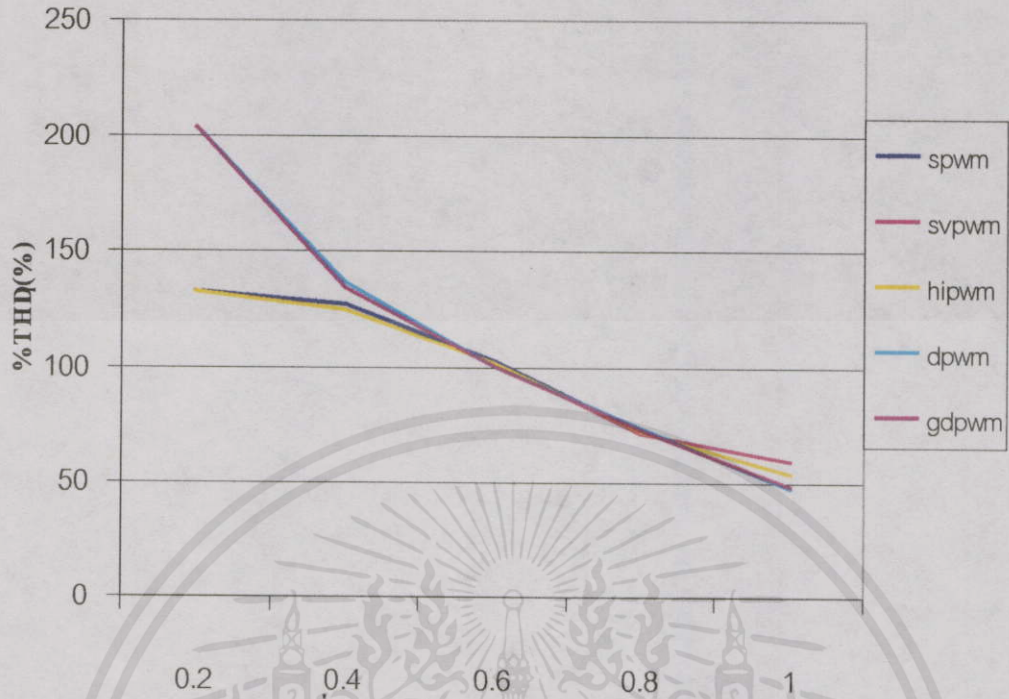
(a)



มอดูละชั้นอินเด็กซ์ (SPWM, GDPWM = 1.15 \* m<sub>n</sub>)

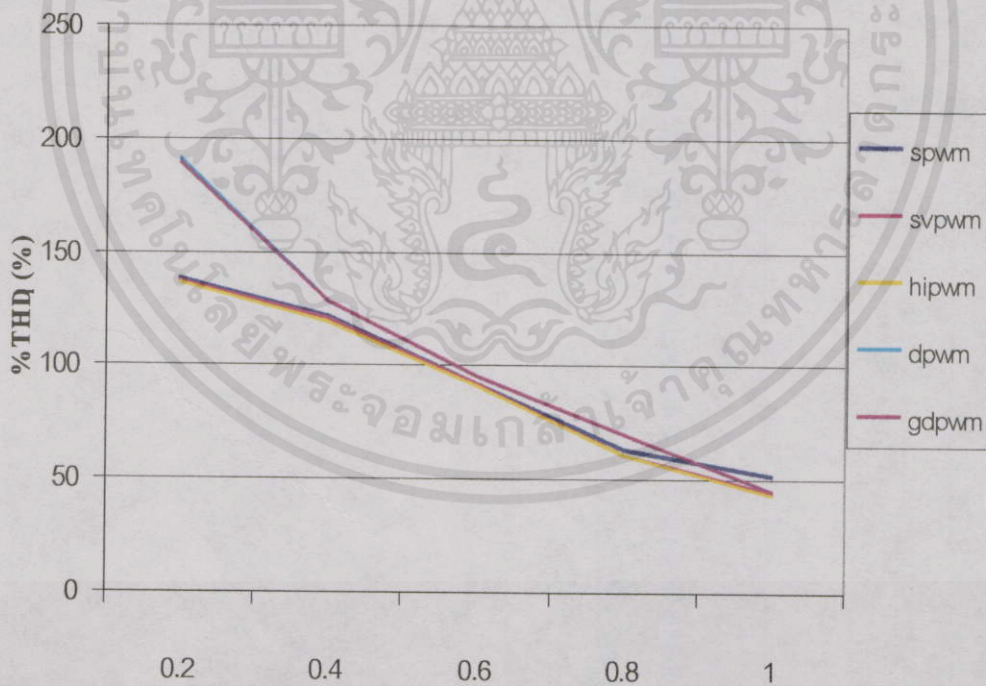
(b)

รูปที่ 5.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูละชั้นอินเด็กซ์กับ เปอร์เซ็นต์  $DF_2$  ที่ได้จากเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.13 (a) ผลการทดลอง (b) ผลจำลองการทำงาน



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>a</sub>)

(a)



มอดูเลชันอินเด็กซ์ (SPWM,GDPWM = 1.15\*m<sub>a</sub>)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์กับเปอร์เซ็นต์ THD<sub>i</sub> ที่ได้จาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ผลิตขึ้นนี้มาใช้

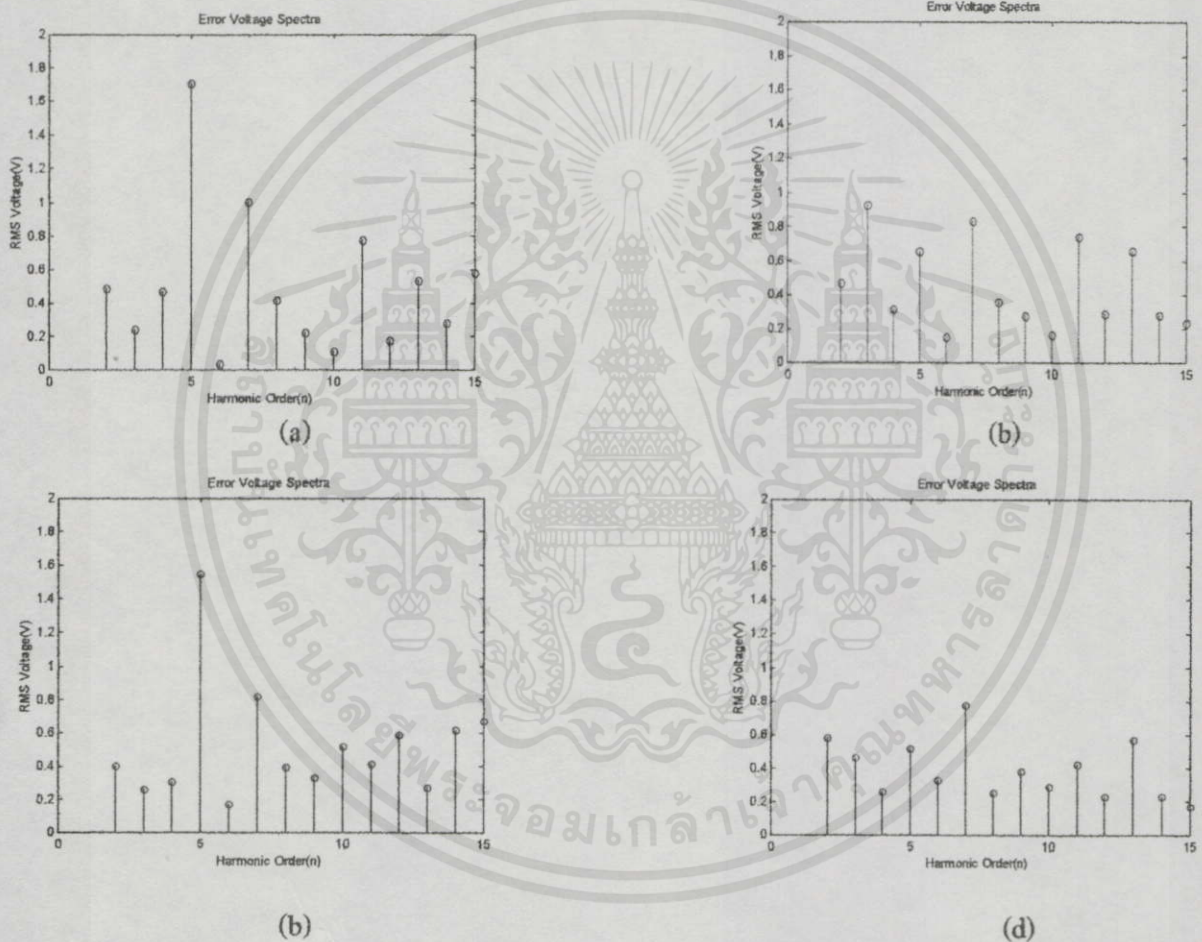
เทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ เงื่อนไขการทำงานเดียวกับตารางที่ 5.14 (a) ผลการทดลอง

(b) ผลจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.37-5.42 แสดงให้เห็นผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และ ได้ผลโดยรวมเช่นเดียวกับการต่อโหลดแบบ R ที่ 2% โดยยังคงมีค่าความผิดพลาดในการคำนวณ ที่ ค่า % DF<sub>1</sub> ของ DPWM120 ที่มีคูเลชันอินเด็กซ์ต่ำอยู่เช่นเดิม

### 5.2.3 ผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจากผลของเดค้ไทม์และวงจรถดเชย

ส่วนนี้จะแสดงผลของการลดฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ โดยใช้วงจรถดเชยผลของเดค้ไทม์ซึ่งจะ พิจารณาเป็นพิเศษที่ฮาร์โมนิกส์ตั้งแต่ลำดับที่ 2 ถึง 15 ค่าดัชนีคุณภาพทั้งหมดจะคำนวณจากฮาร์โมนิกส์ลำดับดังกล่าวเท่านั้นเพื่อให้เห็นถึงคุณสมบัติในด้านฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ

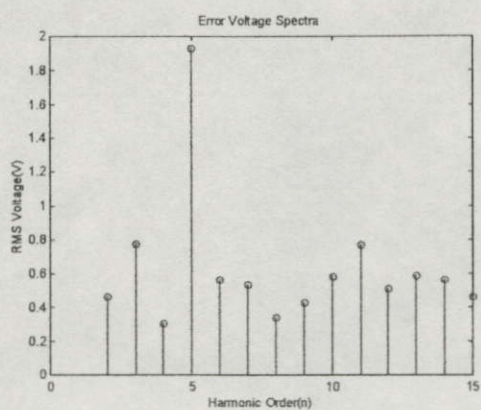


รูปที่ 5.43สเปคตราระงัดแรงดันเอาต์พุตที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ(2<sup>nd</sup> ถึง 15<sup>th</sup>) ที่จุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.1

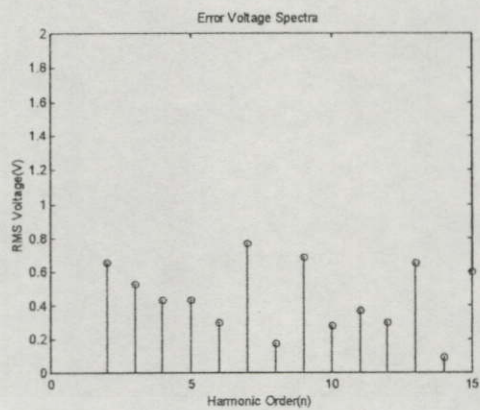
โหลด 3 เฟสสมมูลย์ต่อแบบเดค้ต่ำ  $p.f. = 0.73$ ,  $m_a = 0.69$  สำหรับ SPWM และ GDPWM และเท่ากับ 0.6 สำหรับการสวิตช์แบบอื่น (a),(c),(e),(g), (I) เป็นผลการทดลอง

แบบไม่มีการชดเชยผลของเดค้ไทม์ส่วน (b), (d), (e),(h), (j) เป็นผลการทดลองของวงจรถดเชย

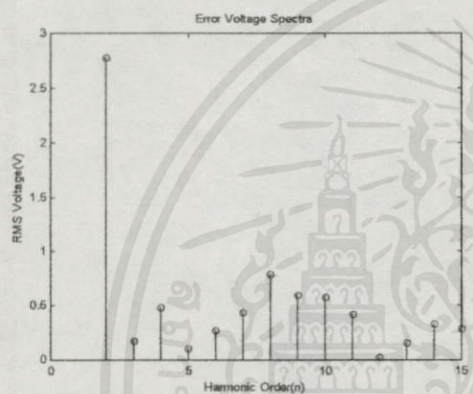
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าที่มีการชดเชยผลของเดค้ไทม์ของเทคนิค SPWM, HIPWM, SVPWM, DPWM และ GDPWM ตามลำดับ



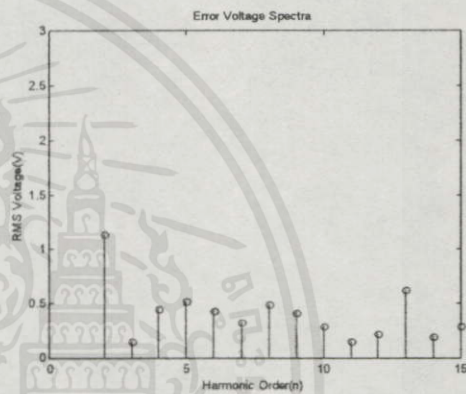
(c)



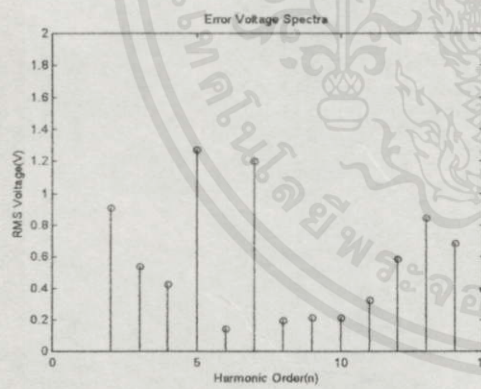
(f)



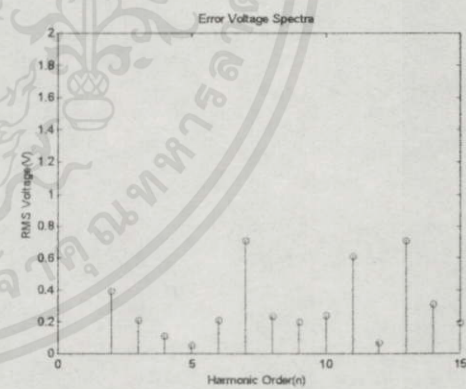
(g)



(h)



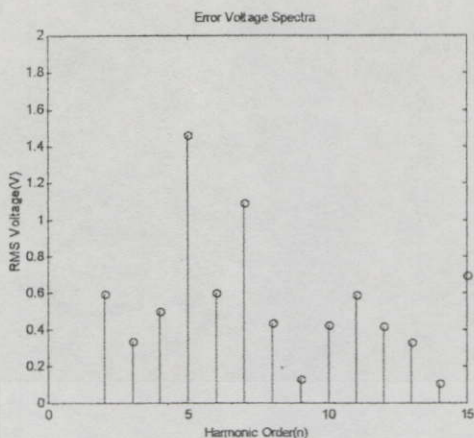
(i)



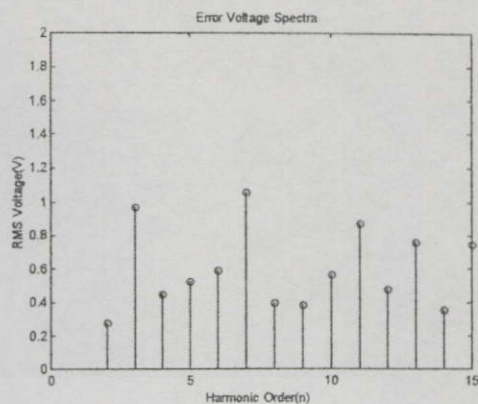
(j)

รูปที่ 5.43(ต่อ)

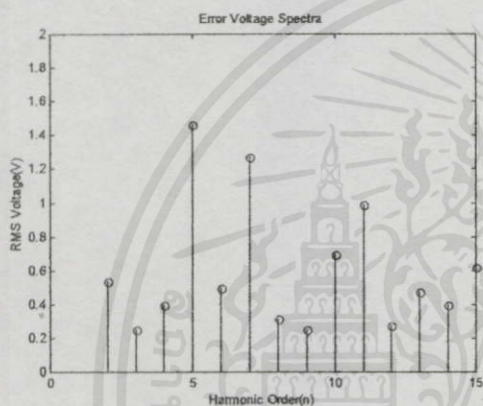
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



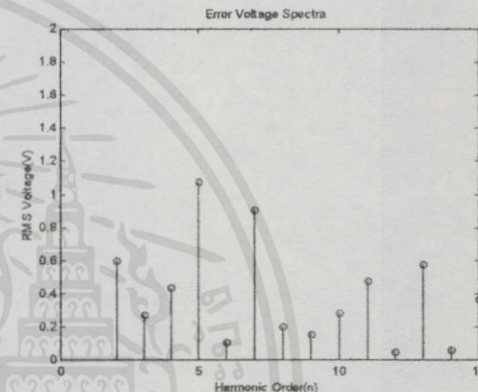
(a)



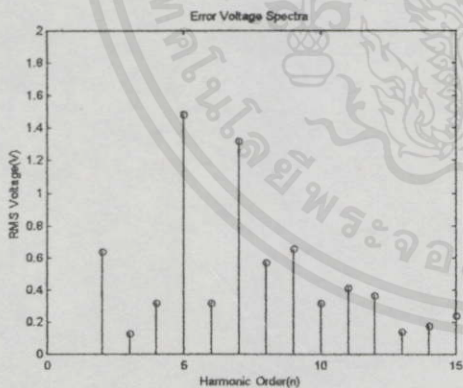
(b)



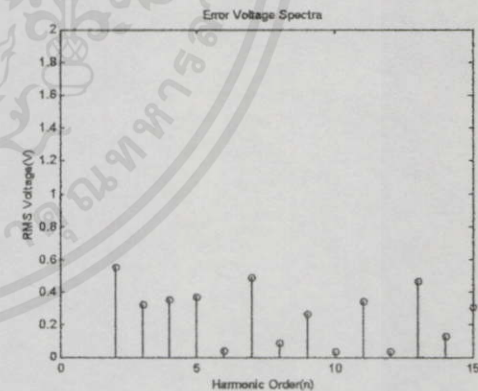
(c)



(d)



(e)



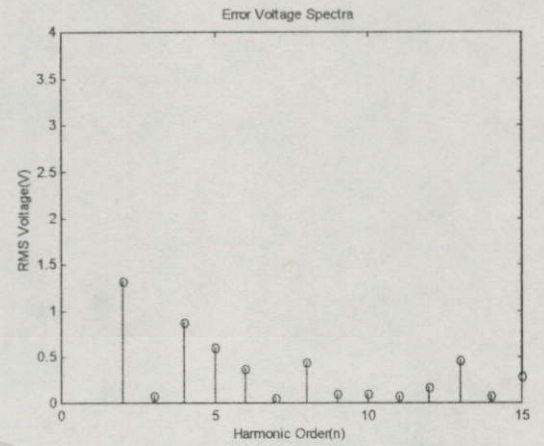
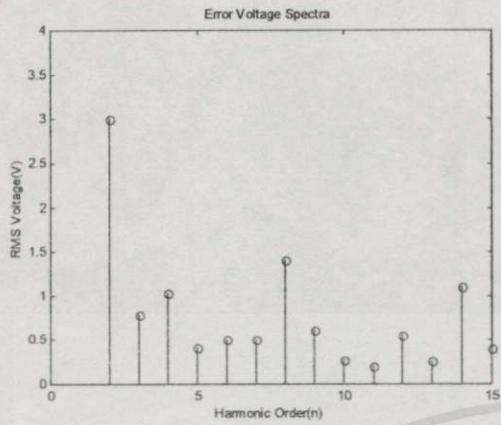
(f)

รูปที่ 5.44สเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตที่ฮาร์โมนิกลำดับต่ำ(2<sup>nd</sup> ถึง 15<sup>th</sup>) ที่จุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.1

โพลด์ 3 เฟสสมดุลย์ต่อแบบเคลด้า  $p.f. = 0.73$ ,  $m_a = 0.92$  สำหรับ SPWM และ

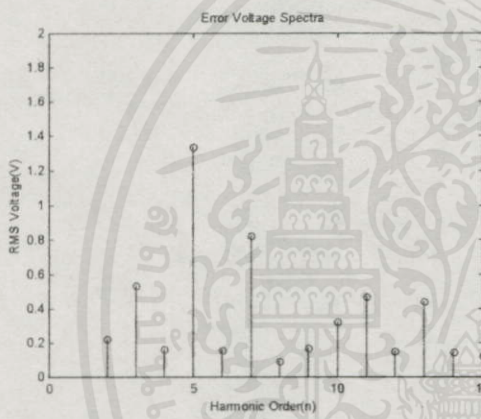
GDPWM และเท่ากับ 0.8 สำหรับการสวิตช์แบบอื่น (a),(c),(e),(g),(I) เป็นผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ یشنด้านการค้า  
 แบบไม่มีการชดเชยผลของเค็ดใหม่ส่วน (b), (d), (e),(h), (j) เป็นผลการทดลองของวงจร  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงนอหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ที่มีการชดเชยผลของเค็ดใหม่ของเทคนิค SPWM, HIPWM, SVPWM, DPWM และ  
 GDPWM ตามลำดับ

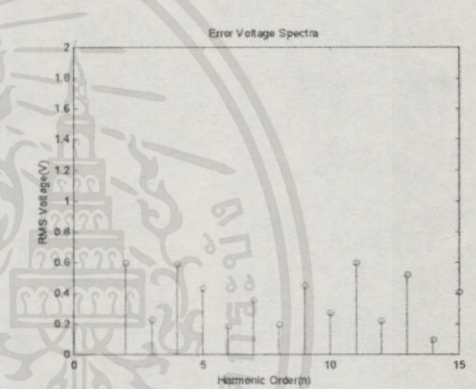


(g)

(h)



(i)



(j)

รูปที่ 5.43(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านแรงดันไฟฟ้าระหว่าง  
 วงจรที่ไม่มี การชดเชยผลของเดือ้ไทม์กับวงจรที่มีการชดเชยผลของเดือ้ไทม์ ที่ความถี่  
 การสวิตช์เป็น 4.05 kHz, แรงดันดีซีลิงค์ = 310 Vdc, เดือ้ไทม์ประมาณ 2% ของ  
 ความถี่การสวิตช์ แบบมีโหลคการะ p.f. = 0.73

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันเอาต์พุท										
	$V_{1rms}$	$V_{1rms}^*$	$V_{rms}$	$V_{rms}^*$	$THD_v$	$THD_v^*$	$DF_1$	$DF_1^*$	$DF_2$	$DF_2^*$	
SPWM	0.23	40.96	39.4	69.96	68.3	3.43	3.73	0.52	0.80	0.11	0.26
	0.69	127.3	127.8	176.8	174.3	1.93	1.52	0.38	0.35	0.12	0.12
	0.92	172.5	163.9	206.8	195.0	1.41	1.47	0.29	0.25	0.10	0.08
HIPWM	0.2	41.4	39.1	70.4	67.7	3.06	4.14	0.77	0.86	0.28	0.26
	0.6	127.8	127.5	176.8	173.9	1.81	1.25	0.33	0.30	0.12	0.12
	0.8	174.1	164.4	206.9	193.0	1.51	1.24	0.28	0.25	0.09	0.09
SVPWM	0.2	41.4	39.1	70.4	67.7	2.82	4.87	0.70	1.51	0.21	0.67
	0.6	127.7	126.3	176.7	172.3	2.16	1.45	0.43	0.34	0.13	0.14
	0.8	172.0	163.3	205.1	191.9	1.41	0.73	0.29	0.20	0.10	0.09
DPWM120	0.2	42.7	41.1	93.1	87.6	7.25	5.96	3.29	1.92	1.62	0.51
	0.6	131.1	126.8	183.1	176.1	2.41	1.41	1.07	0.47	0.53	0.27
	0.8	172.2	162.8	206.5	199.9	2.24	1.17	0.91	0.44	0.43	0.21
GDPWM	0.2	41.84	42.98	92.07	92.73	4.45	2.64	0.88	0.58	0.24	0.24
	0.6	131.0	125.2	183.6	174.9	1.91	1.39	0.46	0.20	0.19	0.20
	0.8	175.8	167.9	215	205.7	1.30	1.08	0.27	0.22	0.09	0.09

(ไม่มี \* หมายถึง ผลจากการวัดของวงจรที่ไม่มี การชดเชยผลของเดือ้ไทม์, มี \* หมายถึง ผลจากการ  
 วัดของวงจรที่มีการชดเชยผลของเดือ้ไทม์ ค่า  $THD_v$ ,  $DF_1$  และ  $DF_2$  คัดตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ถึง 15  
 เพื่อพิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำเท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นสัญญาณทางด้านกระแสไฟฟ้าระหว่าง  
 วงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเค็ดไทม์กับวงจรที่มีการชดเชยผลของเค็ดไทม์ ที่ความถี่  
 การสวิตช์เป็น 4.05 kHz, แรงดันดีซีลิงค์ = 310 Vdc, เค็ดไทม์ประมาณ 2% ของ  
 ความถี่การสวิตช์ แบบมีโหลดการะ p.f. = 0.73

เทคนิค / $m_a$	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านกระแสเอาต์พุต					
	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$I_{rms}$	$I_{rms}^*$	$THD_i$	$THD_i^*$
SPWM 0.23	1.11	1.11	1.11	1.12	2.08	2.03
	0.69	2.75	2.73	2.76	2.74	1.43
	0.92	3.32	3.58	3.32	3.59	1.39
HIPWM 0.2	1.12	1.11	1.12	1.12	2.14	1.99
	0.6	2.75	2.73	2.76	2.73	1.38
	0.8	3.33	3.59	3.33	3.59	1.33
SVPWM 0.2	1.11	1.10	1.11	1.10	2.10	2.06
	0.6	2.74	2.74	2.74	2.74	1.50
	0.8	3.32	3.58	3.33	3.59	1.30
DPWM120 0.2	1.16	1.12	1.16	1.12	4.60	2.67
	0.6	2.79	2.74	2.79	2.74	2.12
	0.8	3.38	3.58	3.38	3.59	1.67
GDPWM 0.2	1.08	1.17	1.08	1.18	3.14	2.8
	0.6	2.75	2.83	2.75	2.84	1.69
	0.8	3.41	3.53	3.41	3.54	1.39

(ไม่มี \* หมายถึง ผลจากการวัดของวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเค็ดไทม์, มี \* หมายถึง ผลจากการ  
 วัดของวงจรที่มีการชดเชยผลของเค็ดไทม์ ค่า  $THD_i$  คัดตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ถึง 15 เพื่อพิจารณา  
 ผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับค่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 ค่าขนาดแรงดันอาร์เอ็มเอสของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำของรูปคลื่นสัญญาณเปรียบเทียบ  
ระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่กับวงจรที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่  
ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 5.42

ลำดับฮาร์ โมนิกส์	S	S*	HI	HI*	SV	SV*	D	D*	GD	GD*
2	0.49	0.47	0.4	0.58	0.46	0.65	2.78	1.12	0.91	0.39
3	0.24	0.93	0.26	0.46	0.77	0.53	0.18	0.14	0.54	0.21
4	0.47	0.32	0.31	0.25	0.3	0.43	0.48	0.44	0.43	0.12
5	1.71	0.66	1.55	0.53	1.93	0.43	0.11	0.52	1.27	0.06
6	0.04	0.15	0.17	0.33	0.56	0.30	0.27	0.43	0.15	0.21
7	1	0.83	0.81	0.78	0.53	0.76	0.44	0.32	1.2	0.71
8	0.42	0.36	0.4	0.25	0.34	0.17	0.79	0.49	0.1	0.24
9	0.22	0.27	0.33	0.37	0.43	0.68	0.6	0.42	0.22	0.20
10	0.13	0.16	0.52	0.29	0.58	0.28	0.58	0.29	0.22	0.25
11	0.77	0.74	0.41	0.42	0.77	0.36	0.43	0.18	0.37	0.62
12	0.17	0.29	0.59	0.23	0.51	0.31	0.03	0.19	0.59	0.07
13	0.53	0.66	0.27	0.58	0.59	0.64	0.16	0.62	0.84	0.72
14	0.28	0.28	0.62	0.24	0.57	0.08	0.33	0.18	0.68	0.31
15	0.58	0.23	0.67	0.17	0.47	0.59	0.29	0.29	0.39	0.19

S หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ SPWM

HI หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ HIPWM

SV หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM

D หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ DPWM120

GD หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ GDPWM

ไม่มี \* หมายถึง ผลการทดลองของวงจรควบคุมที่ไม่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่

มี \* หมายถึง ผลการทดลองของวงจรควบคุมที่มีการชดเชยผลของเดค้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.18 ค่าขนาดแรงดันอาร์เอ็มเอสของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำของรูปคลื่นสัญญาณเปรียบเทียบ  
ระหว่างวงจรที่ไม่มีผลของเดค้ใหม่กับวงจรที่มีการผลของเดค้ใหม่  
ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 5.43

ลำดับฮาร์ โมนิกส์	S	S*	HI	HI*	SV	SV*	D	D*	GD	GD*
2	0.59	0.27	0.53	0.59	0.64	0.54	3	1.34	0.23	0.59
3	0.34	0.96	0.25	0.26	0.12	0.32	0.75	0.09	0.52	0.23
4	0.5	0.45	0.39	0.43	0.31	0.35	1.03	0.87	0.16	0.58
5	1.46	0.51	1.46	1.07	1.45	0.37	0.4	0.63	1.33	0.42
6	0.6	0.59	0.49	0.11	0.32	0.05	0.5	0.38	0.15	0.18
7	1.09	1.04	1.26	0.90	1.32	0.40	0.5	0.05	0.81	0.35
8	0.43	0.39	0.31	0.19	0.58	0.09	1.4	0.49	0.10	0.20
9	0.13	0.38	0.25	0.16	0.66	0.25	0.61	0.10	0.17	0.44
10	0.42	0.55	0.69	0.28	0.32	0.04	0.27	0.10	0.33	0.27
11	0.59	0.86	0.98	0.47	0.41	0.34	0.21	0.07	0.46	0.59
12	0.42	0.47	0.27	0.04	0.37	0.04	0.55	0.19	0.15	0.23
13	0.33	0.76	0.47	0.58	0.14	0.46	0.26	0.50	0.44	0.51
14	0.1	0.35	0.39	0.06	0.18	0.13	1.1	0.09	0.15	0.10
15	0.69	0.73	0.62	0.36	0.24	0.31	0.4	0.30	0.12	0.41

S หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ SPWM

HI หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ HIPWM

SV หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM

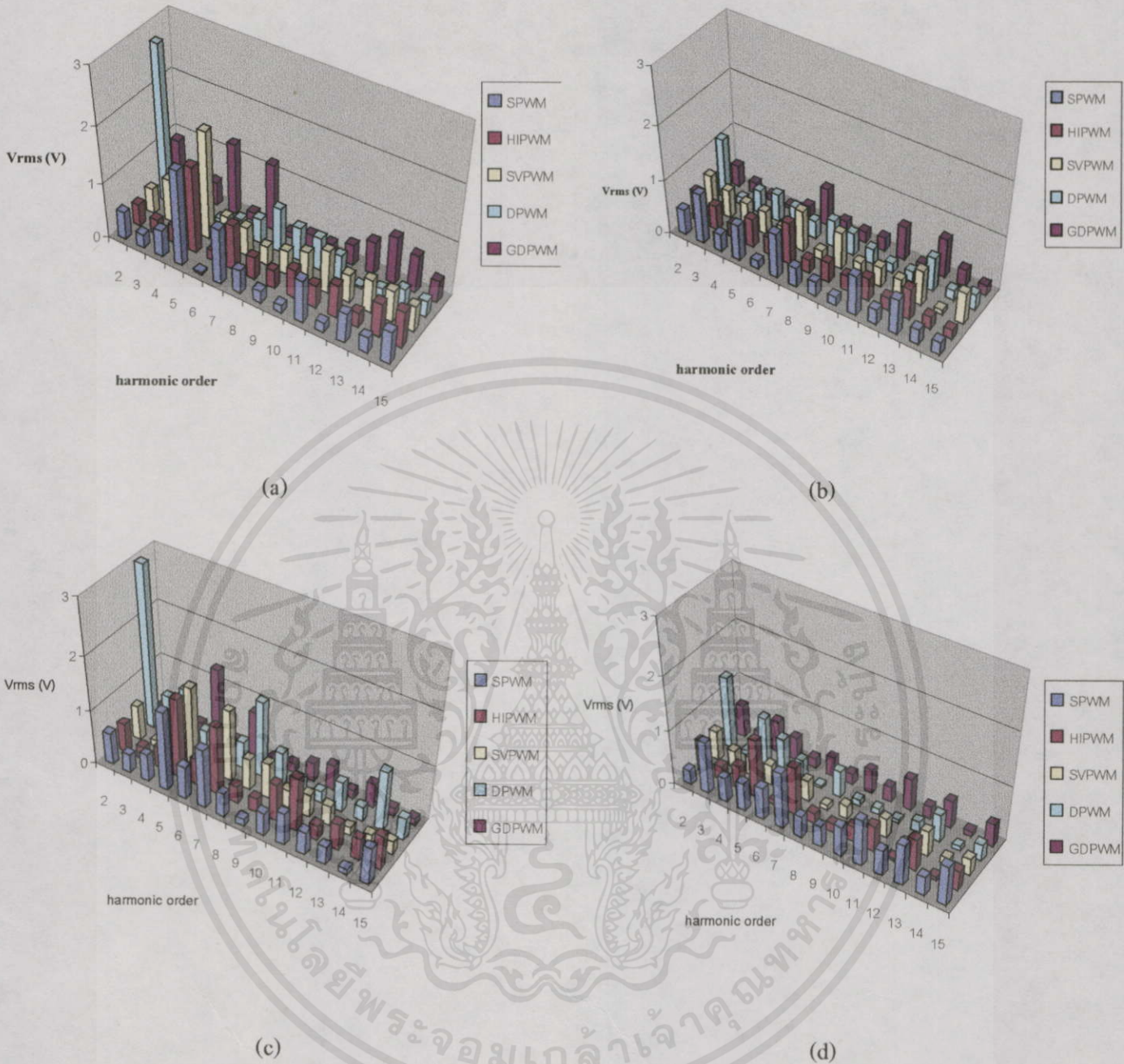
D หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ DPWM120

GD หมายถึง เทคนิคการสวิตช์แบบ GDPWM

ไม่มี \* หมายถึง ผลการทดลองของวงจรควบคุมที่ไม่มีผลของเดค้ใหม่

มี \* หมายถึง ผลการทดลองของวงจรควบคุมที่มีการผลของเดค้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.44 ฮาร์มอนิกลำดับต่ำ 2<sup>nd</sup> ถึง 15<sup>th</sup> ของเทคนิคการสวิตช์แต่ละแบบ รูปที่ (a), (b) เป็นจุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.43 รูปที่ (c), (d) เป็นจุดทำงานเดียวกับรูปที่ 5.44 โดยรูปที่ 5.44 (a) และ 5.44 (c) เป็นผลการทดลองที่ไม่มีวงจรชดเชยผลของเคดีไทม์ ส่วนรูปที่ 5.44 (b) และ 5.44 (d) เป็นผลการทดลองที่มีวงจรชดเชยผลของเคดีไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

### 6.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองและการจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบต่างๆ และการเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ของแต่ละแพทเทริน ในเงื่อนไขโหลดเป็นแบบ R-L, L-L และ R ดังแสดงค่าในตารางที่ 5.1 จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB และผลการทดลองในการคำนวณค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ถึง 5.42 พบว่า ในกรณีเงื่อนไขโหลดแบบ R-L และ L-L นั้นค่า  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $\%THD_1$ ,  $\%THD_2$ ,  $\%DF_1$  ระหว่างผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองส่วนใหญ่ให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วน  $\%DF_1$  ซึ่งเป็นค่าที่มีขนาดน้อยมากนั้นพบว่า มีค่าแตกต่างกันระหว่างการคำนวณกับผลการทดลองอยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณาในหลักของเปอร์เซ็นต์แล้วยังถือว่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีของ DPWM ซึ่งมีผลเนื่องจากความไม่สมมาตรและเกิดฮาร์โมนิกสลับลำดับสูงขึ้น ซึ่งในวงจรไม่ได้รวมผลของอุปกรณ์และความไม่สมมาตรไว้ ทำให้ในกรณีที่ โหลดแบบ R นั้นการคำนวณค่าในส่วนของ  $\%DF_1$  จะเกิดความผิดพลาดขึ้นค่อนข้างสูงมาก ส่วนค่าอื่นๆจะให้ผลใกล้เคียงกัน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองเปลี่ยนค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ซึ่งทั้งผลการทดลองและผลการจำลองการทำงานให้ผลตรงกันในเรื่องของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ  $\%THD_1$ ,  $\%DF_1$ ,  $\%DF_2$  สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. จากรูปที่ 5.7, 5.13, 5.19, 5.25, 5.31 และ 5.37 รูปคลื่นสัญญาณแบบเทคนิค HIPWM, SVPWM, DPWM120 และ GDPWM จะมีค่าแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแบบ SPWM อยู่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และมีช่วงที่เป็นลิเนียร์มากกว่า

2. จากรูปที่ 5.9-5.12, 5.15-5.18, 5.21-5.24, 5.27-5.30, 5.33-5.36 และ 5.39-5.42 สรุปได้ว่าเทคนิคแบบ DPWM120 จะมีความผิดเพี้ยนในรูปคลื่นสัญญาณสูงมากเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นในย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำๆ รองลงมาคือ เทคนิคแบบ GDPWM ซึ่งมีเพียงค่า  $\%DF_1$  เท่านั้นที่น้อยเท่ากับเทคนิคแบบอื่น ส่วนในย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูง ทั้งเทคนิค GDPWM และเทคนิค DPWM120 จะให้ค่าความผิดเพี้ยนน้อยลงเทียบได้กับเทคนิคอื่น ทำให้สรุปได้ว่า เทคนิคแบบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีรูปคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยนมากที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ ส่วนกรณีมอดูเลชันอินเด็กซ์สูงมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณใกล้เคียงกับเทคนิคแบบสัญญาณต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็น 3. จำนวนการสวิตช์ของเทคนิคแบบสัญญาณพีคดับลิฟต์เอ็ม ไม่ต่อเนื่องจะมีจำนวนครั้งในการสวิตช์น้อยกว่าการสวิตช์ต่อเนื่องที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ และทำให้ความสูญเสียในการสวิตช์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคแบบสัญญาณต่อเนื่อง

4. ในส่วนของการชดเชยผลของเค็ด้าใหม่ พบว่า ผลที่ได้จากวงจรชดเชยผลของเค็ด้าใหม่จะให้ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่าวงจรที่ไม่มีการชดเชยผล ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5,7 ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำที่เกิดจากเค็ด้าใหม่ในระบบสามเฟสจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2, 3 และ 4 อาจเกิดจากความไม่สมมาตรของสัญญาณ 3 เฟส ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากวงจรชดเชยผลเค็ด้าใหม่ที่ออกแบบขึ้นมีความผิดพลาดในอุปกรณ์ประเภท R และ C อยู่ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 6.1 ถึง 6.4 จะแสดงผลสรุปเกี่ยวกับข้อดี-ข้อเสียของแต่ละแพทเทิร์น ทั้งวงจรที่มีการชดเชยผลและไม่มีการชดเชยผลของเค็ด้าใหม่

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ เค็ด้าใหม่ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อโหลดแบบเค็ด้า ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็นโหลด R-L ผลการทดลองวงจรไม่มีการชดเชยผลของเค็ด้าใหม่

เทคนิค	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันและกระแสเอาต์พุต							
	$V_{1rms}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_2$	$I_{1rms}$	$I_{rms}$	$THD_i$
SPWM	0	0	0	+	+	0	0	+
HIPWM	+	+	0	+	+	+	+	+
SVPWM	+	+	0	+	+	+	+	+
DPWM	+	+	-	-	-	+	+	-
GDPWM	+	+	-	0	+	+	+	0

ตารางที่ 6.2 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูง เค็ด้าใหม่ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อโหลดแบบเค็ด้า ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็นโหลด R-L ผลการทดลองวงจรไม่มีการชดเชยผลของเค็ด้าใหม่

เทคนิค	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันและกระแสเอาต์พุต							
	$V_{1rms}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_2$	$I_{1rms}$	$I_{rms}$	$THD_i$
SPWM	0	0	+	0	+	0	0	+
HIPWM	+	+	+	+	+	+	+	+
SVPWM	+	+	+	+	+	+	+	+
DPWM	+	+	+	0	0	+	+	0
GDPWM	+	+	+	+	+	+	+	+

- + หมายถึง ให้คุณลักษณะและคุณสมบัติที่ดี
- 0 หมายถึง ให้คุณลักษณะและคุณสมบัติปานกลาง
- หมายถึง ให้คุณลักษณะและคุณสมบัติที่ไม่ดี

ตารางที่ 6.3 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์ต่ำ เคดีไทม์ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อโหลดแบบเคลด้า ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็นโหลด R-L ผลการทดลองวงจรที่มีการชดเชยผลของเคดีไทม์

เทคนิค	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันและกระแสเอาต์พุต							
	$V_{I_{rms}}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_2$	$I_{I_{rms}}$	$I_{rms}$	$THD_i$
SPWM	0	0	-	-	-	0	0	0
HIPWM	0	0	-	-	+	0	0	0
SVPWM	0	0	-	-	-	0	0	0
DPWM	0	0	+	+	+	0	0	+
GDPWM	0	0	+	+	0	0	0	+

ตารางที่ 6.4 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณภาพรูปคลื่นแต่ละแบบที่ย่านมอดูเลชันอินเด็กซ์สูง เคดีไทม์ ประมาณ 2% ของความถี่การสวิตช์ ต่อโหลดแบบเคลด้า ค่าอิมพีแดนซ์เฟสเป็นโหลด R-L ผลการทดลองวงจรที่มีการชดเชยผลของเคดีไทม์

เทคนิค	ค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทางด้านแรงดันและกระแสเอาต์พุต							
	$V_{I_{rms}}$	$V_{rms}$	$THD_v$	$DF_1$	$DF_2$	$I_{I_{rms}}$	$I_{rms}$	$THD_i$
SPWM	0	0	+	+	+	0	0	0
HIPWM	0	0	+	+	0	0	0	0
SVPWM	0	0	+	+	0	0	0	0
DPWM	0	0	+	+	+	0	0	+
GDPWM	0	0	+	+	0	0	0	0

- + หมายถึง ให้ผลดีขึ้นเมื่อมีการใช้วงจรชดเชยผลของเคดีไทม์
- 0 หมายถึง ให้ผลไม่แตกต่างกันหรือต่างกันไม่มากเมื่อมีการใช้วงจรชดเชยผลของเคดีไทม์
- หมายถึง ให้ผลแย่ลงเมื่อมีการใช้วงจรชดเชยผลของเคดีไทม์

## 6.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าโปรแกรมนี้สามารถนำไปใช้เป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบได้

อย่างดี โดยจากตัวอย่างการวิเคราะห์สามารถให้ผู้ออกแบบรู้จักคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน, กระแส ฯลฯ ที่ต้องการทราบได้โดยง่าย อีกทั้งหากต้องการพัฒนารูปคลื่นแบบใหม่ๆเพิ่มเติมก็สามารถทำได้โดยเพียงเพิ่มบล็อกสมการคณิตศาสตร์รูปคลื่นนั้นลงในโปรแกรมได้ สำหรับการวิเคราะห์เพื่อ

เป็นแนวทางในการเลือกใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มให้เหมาะสมกับจุดทำงาน สรุปได้ว่า จากผลที่ได้ รูปคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานที่มอดูเลชันอินเด็กส์ต่ำ (<0.8) คือ รูปคลื่นที่มีสัญญาณต่อเนื่อง ประเภท SVPWM หรือ HIPWM ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าแบบ SPWM และมีความเพี้ยนของสัญญาณใกล้เคียงกัน ส่วนรูปคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานที่มอดูเลชันอินเด็กส์ สูง (>0.8) คือรูปคลื่นที่มีสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (DPWM หรือ GDPWM) เนื่องจากให้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูง, มีความสูญเสียน้อยกว่าและให้ความเพี้ยนของสัญญาณใกล้เคียงกันเช่นกัน

ผลจากวงจรชดเชยผลของเคดีไทม์สรุปได้ว่า ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำที่เกิดขึ้นในระบบสามเฟสจะลดลงเมื่อเทียบกับวงจรที่ไม่มีการชดเชยผลในทุกรูปแบบแพทเทิร์นการสวิตช์

### 6.3 ข้อควรปรับปรุงและข้อเสนอแนะ

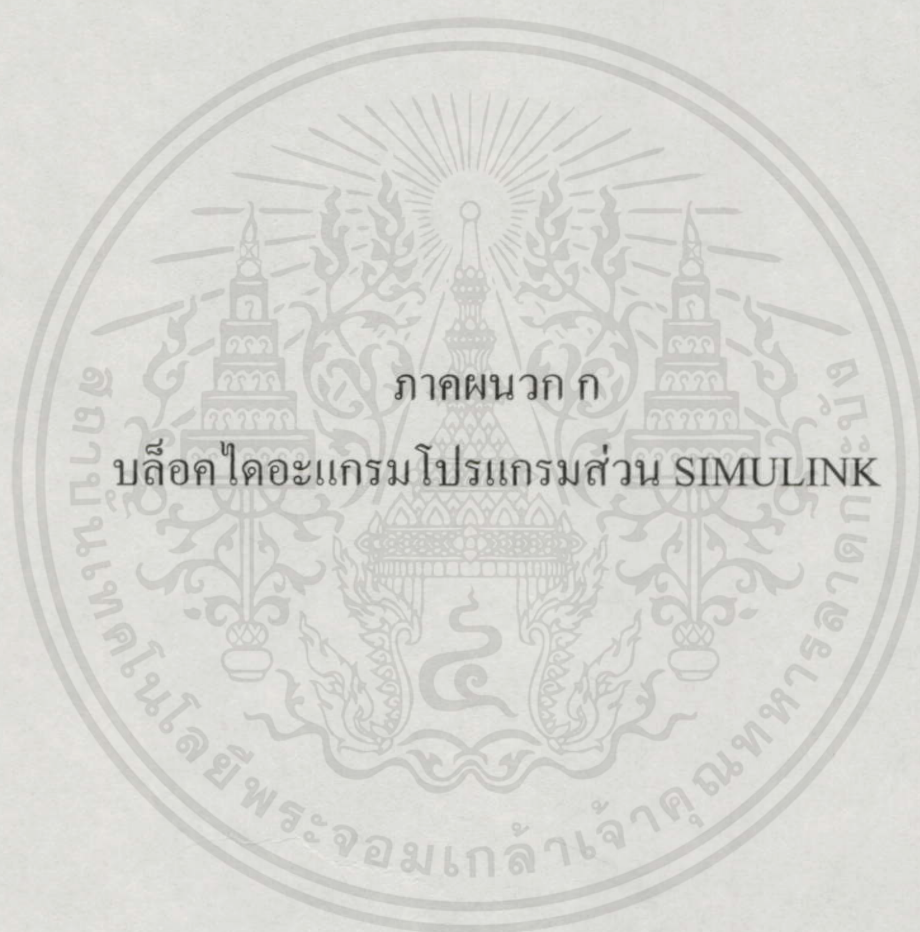
เนื่องจากโปรแกรมที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้รวมผลอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ ที่อาจเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้น ซึ่งทำให้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงานไม่ตรงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ต่อโหลดที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง เนื่องจากแรงดันตกคร่อมจะมากขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวอุปกรณ์ ในส่วนของวงจรควบคุมที่ใช้ชดเชยผลของเคดีไทม์ ได้ใช้วงจร R และ C ในการเลื่อนสัญญาณเพื่อนำไปเข้าวงจรลอจิกสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวเกิดการผิดพลาดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดในค่า R และ C ที่ใช้ แนวทางการพัฒนานี้ซึ่งสามารถทำได้ในอนาคต คือ ทำการรวมผลของตัวอุปกรณ์ซึ่งอาจใช้สมการคณิตศาสตร์ หรือใช้ Power System Toolbox ในโปรแกรม MATLAB ได้ และในส่วนวงจรชดเชยผลของเคดีไทม์ ควรใช้ค่า R และ C ที่มีความผิดพลาดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

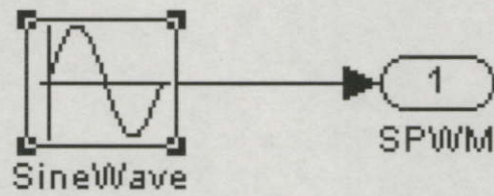
## เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Khan-ngern. "The Analysis and Evaluation of Pulsewidth Modulation Techniques for Inverters." Ph.D. Thesis of Philosophy of University of London and for the Diploma of Membership of Imperial College. 1997.
- [2] Ahmet, M. H. et. al. "A High-Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm." IEEE Trans. on Industry Applications. vol. 34, no. 5, 1998. pp 1059-1071.
- [3] Seung-Gi Jeong an Min-Ho Park. "The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters." IEEE Trans. on Industrial Application. vol. 38, no. 2, 1991. pp. 108-114.
- [4] M. Boost and P. D. Ziogas. "State of the Art PWM Techniques: A Critical Evaluation." IEEE Trans. on Ind. Applications. no. 2, 1988. pp. 271-280.
- [5] Mohan, Undeland and Robbin. **Power electronics, Converter Applications, and Design.** 2 nd editor. John-Wiley., 1995., pp 231-232.
- [6] V. A. Agelidis, P. D. Ziogas, and G Joos. "Dead-Band PWM Switching Patterns." IEEE Trans. on Power Electronics. vol. 11, no. 4, 1996. pp. 522-531.
- [7] Daniel W. Hart. **Introduction to power electronics.** Prentice-hall international INC. pp.30-43

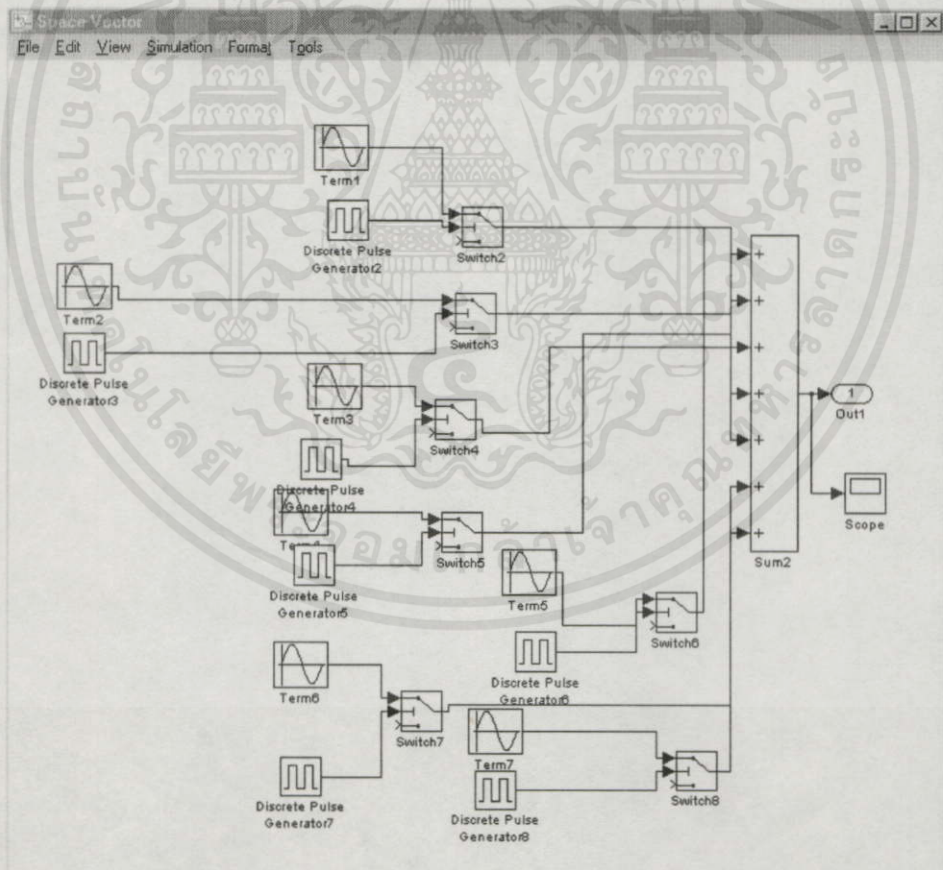
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



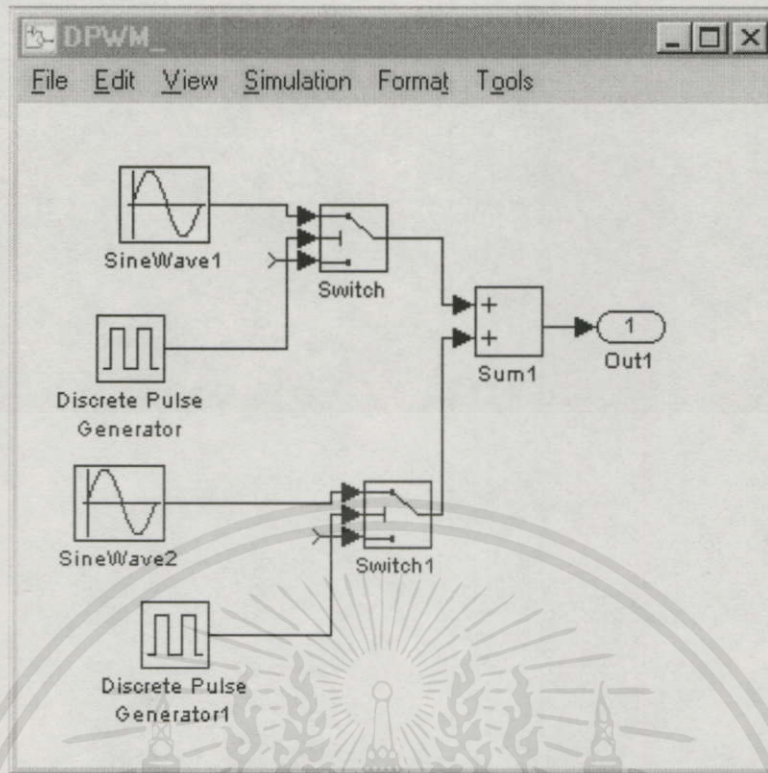
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



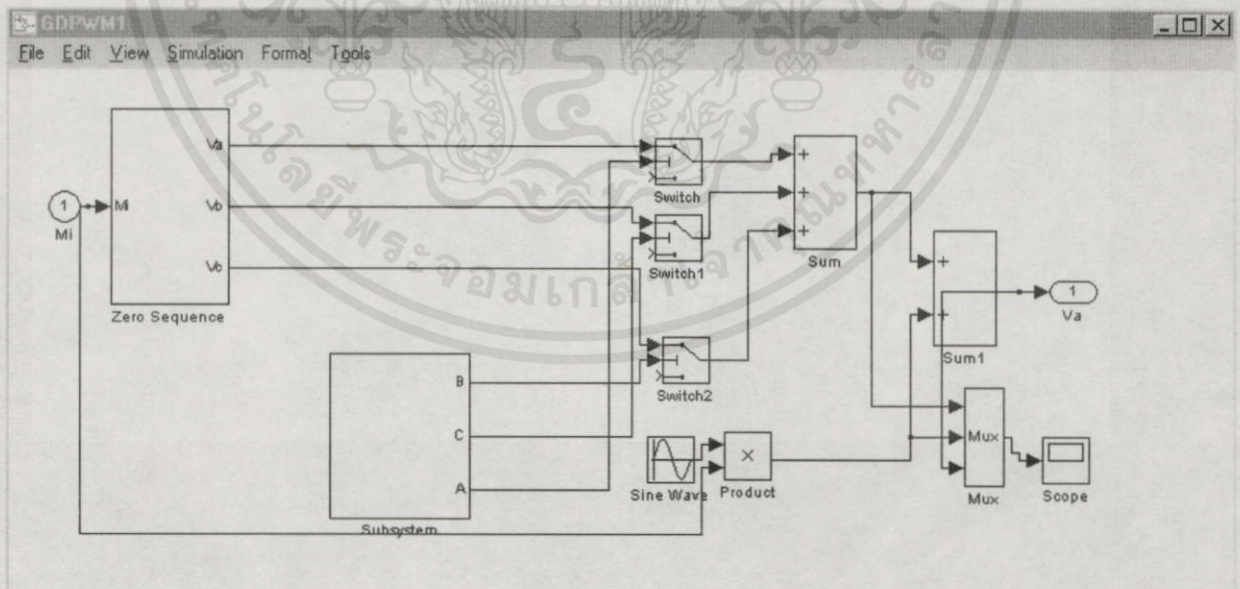
รูปที่ ก.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม SPWM



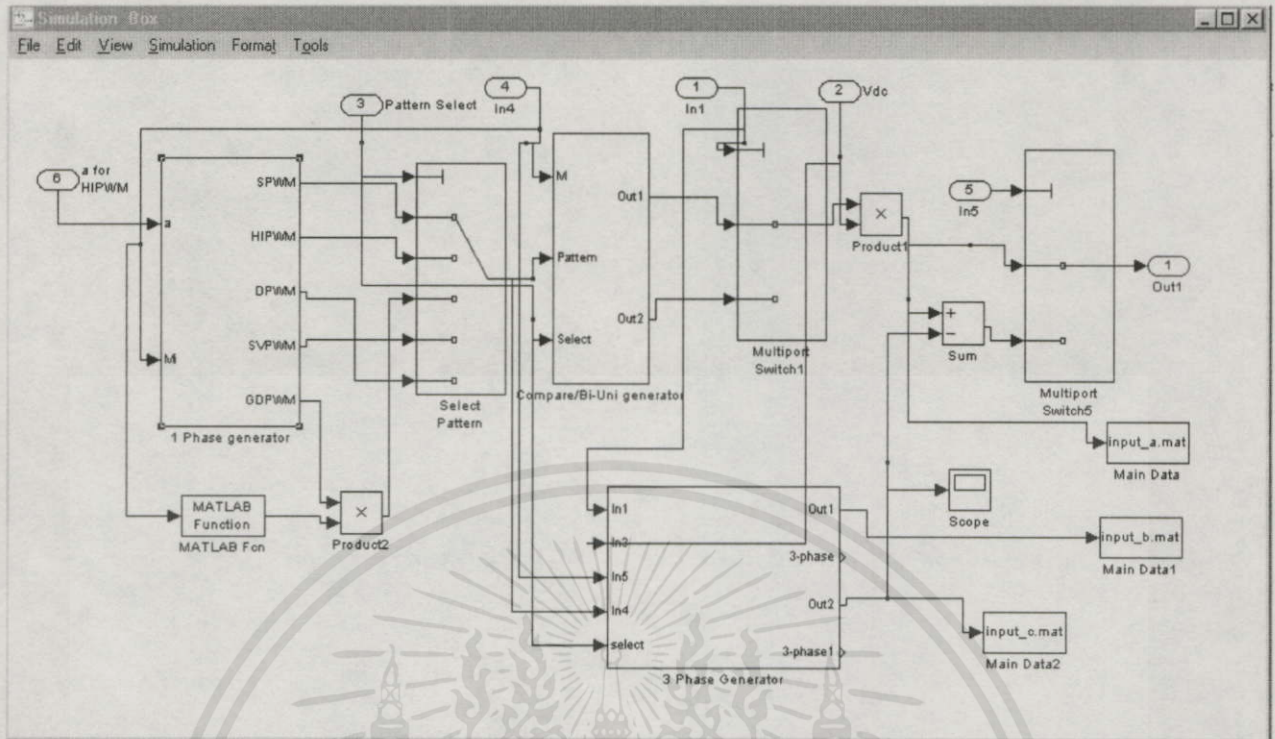
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก **รูปที่ ก.2** แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม SVPWM ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม DPWM120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก **รูปที่ ก.4** แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนสร้างสัญญาณควบคุม GDPWM ที่การนำไปใช้



รูปที่ ๓.๕ แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1 โปรแกรมส่วนวิเคราะห์สัญญาณ

```

%data file from .mdl file
load input.mat;
load input3.mat;
load inputtemp.mat;
load input_a.mat;
load input_b.mat;
load input_c.mat;
%-----%
Vtemp=tin';
Vin=temp';
for q=1:16384
    a=Vtemp(q+16384,1);
    Vin(q,1)=a;
    a=Vtemp(q+16384,2);
    Vin(q,2)=a;
end
%Voltage FFT Analysis and Print out Votage spectrum
% GATE A
VG_AN=VAN;
for q=1:16384
    if VAN(q,2)>1;
        VG_AN(q,2)=1;
    else
        VG_AN(q,2)=0;
    end
end
%Gate A including deadtime effect
Vtemp=Vcn';
VCN=temp';
for q=1:16384

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for q=1:16384

```

```

a=Vtemp(q+16384,1);
VCN(q,1)=a;
a=Vtemp(q+16384,2);
VCN(q,2)=a;
end

```

```
% GATE C
```

```
VG_CN=VCN;
```

```
for q=1:16384
```

```
if VCN(q,2)>1;
```

```
    VG_CN(q,2)=1;
```

```
else
```

```
    VG_CN(q,2)=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
%translate Trig Gate B
```

```
Vtemp=Vbn';
```

```
VBN=temp';
```

```
for q=1:16384
```

```
    a=Vtemp(q+16384,1);
```

```
    VBN(q,1)=a;
```

```
    a=Vtemp(q+16384,2);
```

```
    VBN(q,2)=a;
```

```
end
```

```
% GATE B
```

```
VG_BN=VBN;
```

```
for q=1:16384
```

```
if VBN(q,2)>1;
```

```
    VG_BN(q,2)=1;
```

```
else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด VG\_BN(q,2)=0; มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end
```

```

end
% GATE INVERSE A
VGI_AN = VG_AN;
for q=1:16384
    if VG_AN(q,2)==1;
        VGI_AN(q,2)=0;
    else
        VGI_AN(q,2)=1;
    end
end
end
% GATE INVERSE B
VGI_BN = VG_BN;
for q=1:16384
    if VG_BN(q,2)==1;
        VGI_BN(q,2)=0;
    else
        VGI_BN(q,2)=1;
    end
end
end
% GATE INVERSE C
VGI_CN = VG_CN;
for q=1:16384
    if VG_CN(q,2)==1;
        VGI_CN(q,2)=0;
    else
        VGI_CN(q,2)=1;
    end
end
end
Temp1 = VG_AN;

```

เอกสารนี้  $VGI\_AN = VG\_AN$ ; สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณี  $VGI\_AN = Temp1$ ; มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Temp1 = VG_BN;
VG_BN = VGI_BN;
VGI_BN = Temp1;
Temp1 = VG_CN;
VG_CN = VGI_CN;
VGI_CN = Temp1;
% ideal Phase voltage
wave1 = VDC*(VG_AN-0.5);
wave2 = VDC*(VG_BN-0.5);
wave3 = VDC*(VG_CN-0.5);
% ideal Line to Line voltage
wave4 = wave1-wave2;
wave5 = wave2-wave3;
wave6 = wave3-wave1;
Za = input('Please Enter Impedance of Phase a' );
pfa= input('Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase a');
%Zb = input('Please Enter Impedance of Phase b' );
%pfb= input('Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase b');
%Zc = input('Please Enter Impedance of Phase c' );
%pfc= input('Please Enter Powerfactor of Impedance of Phase c');
connect = input('Please Enter Connecting 1:star 2: delta');
Zb = Za;
Zc = Za;
pfb = pfa;
pfc = pfa;
if connect==1, Re=(Za*Zb*cos(acos(pfa)+acos(pfb)))+(Zb*Zc*cos(acos(pfb)+acos(pfc)))+(Zc*Za*cos(acos(pfc)+acos(pfa)));
Im=(Za*Zb*sin(acos(pfa)+acos(pfb)))+(Zb*Zc*sin(acos(pfb)+acos(pfc)))+(Zc*Za*sin(acos(pfc)+acos(pfa)));
elseif connect==2, Re=(Za*Zb*cos(acos(pfa)+acos(pfb)))+(Zb*Zc*cos(acos(pfb)+acos(pfc)))+(Zc*Za*cos(acos(pfc)+acos(pfa)));
Im=(Za*Zb*sin(acos(pfa)+acos(pfb)))+(Zb*Zc*sin(acos(pfb)+acos(pfc)))+(Zc*Za*sin(acos(pfc)+acos(pfa)));
end
%การคำนวณค่า Za จากค่า ZY และค่า Z0
Za = ZY/Z0;
pfa= cos(oY-acos(pfa));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร [oY,ZY]=CART2POL(Re,Im);เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น Za = ZY/Za; ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pfa= cos(oY-acos(pfa));

```

Zb = ZY/Zb;
pfb= cos(oY-acos(pfb));
Zc = ZY/Zc;
pfc= cos(oY-acos(pfc));
else end

%I phase AB
V=wave4(:,2);
pf=pfa;
Z=Za;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.000001220703125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
IAB=V;
for i=1:10
    TS=0;
    for q=1:(tf/step)+1
        IAB(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
    TS=TS+step;
    T(q)=TS;
    I = IAB(q);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด end ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%I phase BC
V=wave5(:,2);
pf=pfb;
Z=Zb;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.000001220703125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
IBC=V;
for i=1:10
    TS=0;
    for q=1:(tf/step)+1
        IBC(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
        TS=TS+step;
        T(q)=TS;
        I = IBC(q);
    end
end

%I phase CA
V=wave6(:,2);
pf=pf;
Z=Zc;
angle=acos(pf);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.000001220703125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
ICA=V;
for i=1:10
    TS=0;
    for q=1:(tf/step)+1
        ICA(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
    TS=TS+step;
    T(q)=TS;
    I = ICA(q);
end
end

%-----%
IB = IBC-IAB;
IA = IAB-ICA;
IC = ICA-IBC;

%-----%

d = input('Please Enter the n*1.22us deadtime (4/9)')

```

เอกสารนี้ %Actual Gate A นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด  $VGDE\_AN = VG\_AN$ ; หักดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 1:16383
    Z=[VG_AN(i,2) VG_AN(i+1,2) ];
    if Z == [0 1 ],
        if IA(i) > 0,
            for j = 1:d
                VGDE_AN(i+j,2)=0;
            end
        else end
    else end
end

for i = 1:16383
    Z=[VGI_AN(i,2) VGI_AN(i+1,2) ];
    if Z == [0 1 ],
        if IA(i) < 0,
            for j = 1:d
                VGDE_AN(i+j,2)=1;
            end
        else end
    else end
end

errorA = VG_AN(:,2)-VGDE_AN(:,2);
%y = [VGDE_AN(:,2)+5 VG_AN(:,2)+3 errorA wave4/310-3 (IA/5)-6];
%figure(55);
%plot(VG_AN(:,1), y);
%axis([0.02 0.04 -10 7]);
%grid on;
%Actual Gate B

```

เอกสารนี้  $VGDE\_BN = VG\_BN$ ; หารับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

```

for i = 1:16383
    Z=[VG_BN(i,2) VG_BN(i+1,2) ];

```

```

if Z == [0 1 ],
    if IB(i) > 0,
        for j = 1:d
            VGDE_BN(i+j,2)=0;
        end
    else end
else end
end
for i = 1:16383
    Z=[VGI_BN(i,2) VGI_BN(i+1,2) ];
    if Z == [0 1 ],
        if IB(i) < 0,
            for j = 1:d
                VGDE_BN(i+j,2)=1;
            end
        else end
    else end
end

errorB = VG_BN(:,2)-VGDE_BN(:,2);
%y = [VGDE_BN(:,2)+5 VG_BN(:,2)+3 errorB wave5/310-3 (IB/5)-6];
%figure(66);
%plot(VG_AN(:,1), y);
%axis([0.02 0.04 -10 7]);
%grid on;
%y1 = [wave5/310 (IB/5)+3];
%figure(67);
%plot(VG_AN(:,1), y1);
%axis([0.02 0.04 -2 5]);
%grid on;
VGDE_CN = VG_CN;

```

เอกสารนี้ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 1:16383
    Z=[VG_CN(i,2) VG_CN(i+1,2) ];
    if Z == [0 1 ],
        if IC(i) > 0,
            for j = 1:d
                VGDE_CN(i+j,2)=0;
            end
        else end
    else end
end
for i = 1:16383
    Z=[VGI_CN(i,2) VGI_CN(i+1,2) ];
    if Z == [0 1 ],
        if IC(i) < 0,
            for j = 1:d
                VGDE_CN(i+j,2)=1;
            end
        else end
    else end
end
errorC = VG_CN(:,2)-VGDE_CN(:,2);
Pvtemp = wave6(:,2);
Pitemp = IB;
for i=1:11289
    Pvtemp(i)=wave6(i+5095,2);
    Pitemp(i)=IB(i+5095);
end
for i=11290:16384
    Pvtemp(i)=wave6(i-11289,2);
    Pitemp(i)=IB(i-11289);
end

```

เอกสารนี้เป็น Pitemp(i)=IB(i-11289); ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด Pitemp(i)=IB(i-11289); คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

end

```

y1 = [-1*Pvtemp/310+3 (Pitemp/5)];
figure(1);
plot(VG_AN(:,1), y1);
axis([0.02 0.04 -2 5]);
grid on;
xlabel('Simulation Voltage and Current VAC and IB ');
ylabel('Amplitude (A) and Voltage (V): (310V/div) and (5 A/div)');
title('Simulated Voltage and Current Waveform');
%Actual Voltage
Actual_AB= VDC*(VGDE_AN(:,2)-VGDE_BN(:,2));
errorAB = wave4(:,2)-Actual_AB;

Actual_CA= VDC*(VGDE_CN(:,2)-VGDE_AN(:,2));
errorCA = wave6(:,2)-Actual_CA;
%spectra of error
vfftA = abs(fft(errorAB)).*((sqrt(2))/(length(errorAB)));
%vfftB = abs(fft(errorB)).*((sqrt(2))/(length(errorB)));
vfftC = abs(fft(errorCA)).*((sqrt(2))/(length(errorCA)));
figure(2);
stem(vfftA(2:100));
axis([0 100 0 10]);
xlabel('Harmonics order');
ylabel('Amplitude (V)');
title('Spectrum of Error voltage from deadtime effect');
%Voltage FFT Analysis and Print out Votage spectrum
V=Actual_AB;
vfft=abs(fft(V)).*((sqrt(2))/(length(V)));
figure(4);
stem(vfft(2:300));
xlabel('Harmonics order');

```

เอกสารนี้  $\text{stem}(vfft(2:300))$ ; ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณี  $V_t=vfft(3:200)$ ; จึงห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ylabel('Amplitude (V)');
title('Spectrum of Actual output voltage waveform');
axis([ 0 300 0 250]);
%-----%
%Find the Actual Current
%I phase AB
V=Actual_AB;
pf=pfa;
Z=Za;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.000001220703125;

%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
IAB=V;
for i=1:10
    TS=0;
    for q=1:(tf/step)+1
        IAB(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
        TS=TS+step;
        T(q)=TS;
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร I = IAB(q); สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด end ั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

end

```

% I Actual CA
V=Actual_CA;
pf=pfa;
Z=Za;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.000001220703125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
ICA=V;
for i=1:10
    TS=0;
    for q=1:(tf/step)+1
        ICA(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
    TS=TS+step;
    T(q)=TS;
    I = ICA(q);
end
end
IA = IAB-ICA;
%-----%

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%Find THDv
THDv=100*(sqrt(sum((Vt).^2)))/vfft(2,1)
V1rms=vfft(2)
Vt1=vfft(1:300);
Vrms=(sqrt(sum((Vt1).^2)))
%-----%
%THDi
ifft=abs(fft(IA)).*((sqrt(2))/(length(IA)));
figure(5);
stem(ifft(2:300));
xlabel('Harmonic order');
ylabel('Amplitude (A)');
title('Spectrum of current ');
It=ifft(3:300);
axis([ 0 300 0 5 ]);
%Find THDi
THDi=100*(sqrt(sum((It).^2)))/ifft(2,1)
I1rms=ifft(2)
It1=ifft(1:1000);
Irms=(sqrt(sum((It1).^2)))
%Find DF1 (AC DF for Second order Filter)
DF1=0;
for q=3:300
    b= (vfft(q)/((q-1)^2))^2;
    DF1 = DF1+b;
end
DF1 = sqrt(DF1);
DF1 = (100*DF1)/vfft(2)
%Find DF2 (AC DF for First order Filter)
DF2=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

ไม่ว่าการตีพิมพ์เอกสารนี้เป็นการรับประกันคุณภาพของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

DF2=0;

```

for q=3:300
    b= (vfft(q)/(q-1))^2;
    DF2 = DF2+b;
end
DF2 = sqrt(DF2);
DF2 = (100*DF2)/vfft(2)

```

## ข.2 โปรแกรมส่วนแปลงสัญญาณและสร้างเค็ดไทม์

```

%data file from .mdl file
load input.mat;
load input3.mat;
load inputtemp.mat;
load input_a.mat;
load input_b.mat;
load input_c.mat;
%-----%

% Prepare matrix data to available for analysis
Vtemp=tin';
Vin=temp';
for q=1:16384
    a=Vtemp(q+16384,1);
    Vin(q,1)=a;
    a=Vtemp(q+16384,2);
    Vin(q,2)=a;
end
%-----%

%Print out Output Votage
figure(2);
plot(Vin(:,1),Vin(:,2));
xlabel('Time (s)');
ylabel('Volt (V)');
title('Output voltage waveform');
axis([0.02 0.04 -50 50]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปคัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Voltage FFT Analysis and Print out Votage spectrum

```

V=Vin(:,2);
vfft=abs(fft(V)).*((sqrt(2))/(length(V)));
Vt=vfft(3:200);
%Find THDv
THDv=100*(sqrt(sum((Vt).^2)))/vfft(2,1)
V1rms=vfft(2)
Vt1=vfft(1:1000);
Vrms=(sqrt(sum((Vt1).^2)))
%-----%
%Find Current and print out
pf=0.5;
Z=10;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.00001220703125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2));
V=V/Z;
IINC=V;
for I=1:20

```

```

    TS=0;

```

```

    for q=1:(tf/step)+1

```

```

        IINC(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);

```

```

    TS=TS+step;

```

```

    T(q)=TS;

```

```

    I = IINC(q);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
end

%figure(4);
%plot(Vin(:,1),IINC)
%xlabel('Time (s)');
%ylabel('Current (V)');
%title('Current waveform');
%-----%

%THDi
ifft=abs(fft(IINC)).*((sqrt(2))/(length(IINC)));
%figure(5);
%stem(ifft(2:100));
%xlabel('Harmomonic order');
%ylabel('Amplitude (A)');
%title('Spectrum of current ');
It=ifft(3:200);
%Find THDi
THDi=100*(sqrt(sum((It).^2))/ifft(2,1)

I1rms=ifft(2)/sqrt(2)
It1=ifft(1:1000);
Irms=(sqrt(sum((It1).^2)))
%translate Trig G
Vtemp=Van';
VAN=temp';
for q=1:16384
    a=Vtemp(q+16384,1);
    VAN(q,1)=a;
    a=Vtemp(q+16384,2);
    VAN(q,2)=a;
end
% GATE A
VG_AN=VAN;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for q=1:16384
    if VAN(q,2)>1;
        VG_AN(q,2)=1;
    else
        VG_AN(q,2)=0;
    end
end
%Gate A including deadtime effect
VGD_AN=VG_AN;
for q=2:16384
    X=[VG_AN(q,2) VG_AN(q-1,2)];
    if X == [1 0], VGD_AN(q,2)=0;VGD_AN(q+1,2)=0;VGD_AN(q+2,2)=0;
    else end
end
%translate Trig G C
Vtemp=Vcn';
VCN=temp';
for q=1:16384
    a=Vtemp(q+16384,1);
    VCN(q,1)=a;
    a=Vtemp(q+16384,2);
    VCN(q,2)=a;
end
% GATE C
VG_CN=VCN;
for q=1:16384
    if VCN(q,2)>1;
        VG_CN(q,2)=1;
    else
        VG_CN(q,2)=0;
    end
end
%Gate C including deadtime effect
VGD_CN=VG_CN;
for q=2:16384

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

X=[VG_CN(q,2) VG_CN(q-1,2)];
if X == [1 0], VGD_CN(q,2)=0;VGD_CN(q+1,2)=0;VGD_CN(q+2,2)=0;
else end
end
%translate Trig Gate B
Vtemp=Vbn';
VBN=temp';
for q=1:16384
    a=Vtemp(q+16384,1);
    VBN(q,1)=a;
    a=Vtemp(q+16384,2);
    VBN(q,2)=a;
end
% GATE B
VG_BN=VBN;
for q=1:16384
    if VBN(q,2)>1;
        VG_BN(q,2)=1;
    else
        VG_BN(q,2)=0;
    end
end
%Gate B including deadtime effect
VGD_BN=VG_BN;
for q=2:16384
    X=[VG_BN(q,2) VG_BN(q-1,2)];
    if X == [1 0], VGD_BN(q,2)=0;VGD_BN(q+1,2)=0;VGD_BN(q+2,2)=0;
    else end
end

% GATE INVERSE A
VGI_AN = VG_AN;
for q=1:16384
    if VG_AN(q,2)==1;
        VGI_AN(q,2)=0;
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
    VGI_AN(q,2)=1;
end
end
%Inverse Gate A including deadtime effect
VGID_AN=VGI_AN;
for q=2:16384
    X=[VGI_AN(q,2) VGI_AN(q-1,2)];
    if X == [1 0], VGID_AN(q,2)=0;VGID_AN(q+1,2)=0;VGID_AN(q+2,2)=0;
    else end
end
%check error
Aerror = 0
for i=1:16384
    AG=VGD_AN(i,2);
    AGI=VGID_AN(i,2);
    C=AG&AGI;
    if C==1, Aerror =-1
    else end
end
% GATE INVERSE B
VGI_BN = VG_BN;
for q=1:16384
    if VG_BN(q,2)==1;
        VGI_BN(q,2)=0;
    else
        VGI_BN(q,2)=1;
    end
end
%Inverse Gate B including deadtime effect
VGID_BN=VGI_BN;
for q=2:16384
    X=[VGI_BN(q,2) VGI_BN(q-1,2)];
    if X == [1 0], VGID_BN(q,2)=0;VGID_BN(q+1,2)=0;VGID_BN(q+2,2)=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else end
end
%check error
Berror = 0
for i=1:16384
    BG=VGD_BN(i,2);
    BGI=VGID_BN(i,2);
    C=BG&BGI;
        if C==1, Berror =-1
        else end
end
% GATE INVERSE C
VGI_CN = VG_CN;
for q=1:16384
    if VG_CN(q,2)==1;
        VGI_CN(q,2)=0;
    else
        VGI_CN(q,2)=1;
    end
end
%Inverse Gate C including deadtime effect
VGID_CN=VGI_CN;
for q=2:16384
    X=[VGI_CN(q,2) VGI_CN(q-1,2)];
    if X == [1 0], VGID_CN(q,2)=0;VGID_CN(q+1,2)=0;VGID_CN(q+2,2)=0;
    else end
end
%safety
for i=1:3
    VGD_AN(i,2)=0;VGD_BN(i,2)=0;VGD_CN(i,2)=0;
    VGID_AN(i,2)=0;VGID_BN(i,2)=0;VGID_CN(i,2)=0;
end
%check error
Error = 0
for i=1:16384

```

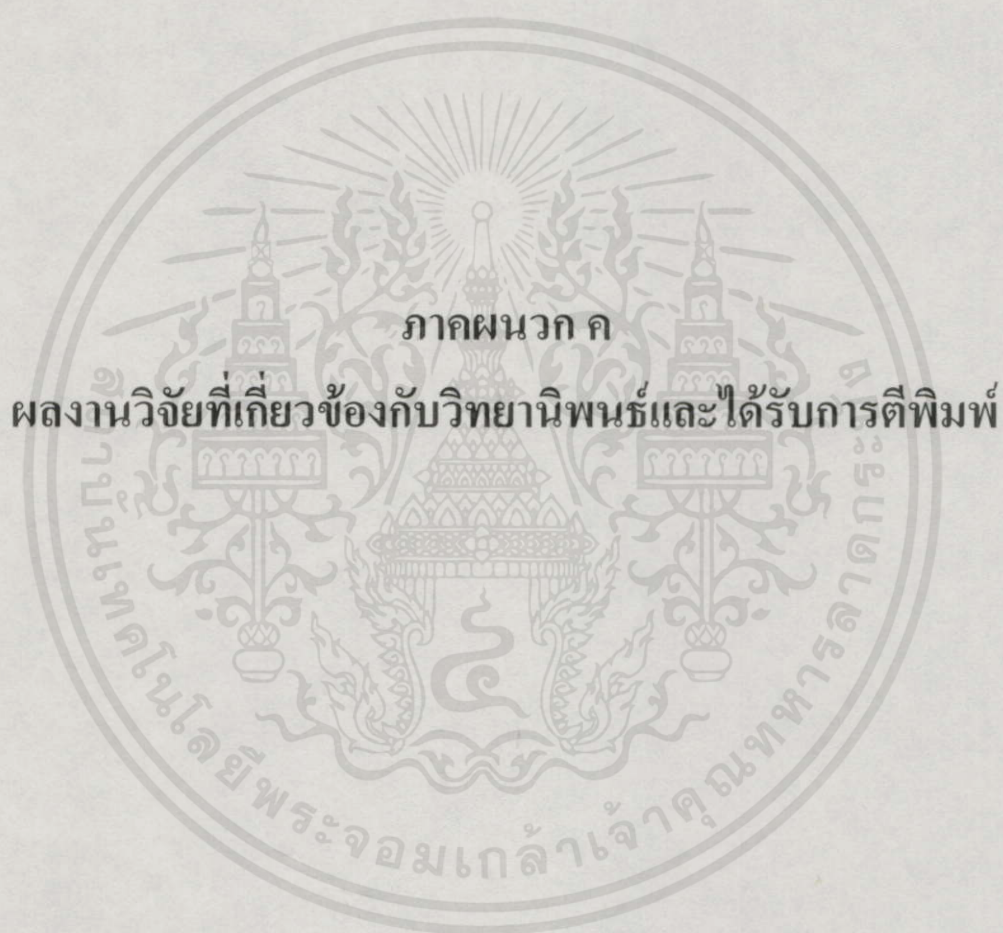
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ในรูปแบบใดก็ตาม ห้ามนำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CG=VGD_CN(i,2);
CGI=VGID_CN(i,2);
C=CG&CGI;
    if C==1, Cerror ==-1
    else end
end
% write to file
fid = fopen('d:\office.dat\results\thesis\1ks06.asm','wt');
P1 = [0 0 '0'; 0 1 '1'; 1 0 '2'; 1 1 '3'];
P2 = [0 0 0 0 '0'; 0 0 0 1 '1'; 0 0 1 0 '2'; 0 0 1 1 '3'; 0 1 0 0 '4'; 0 1 0 1 '5'; 0 1 1 0 '6'; 0 1 1 1 '7';
    1 0 0 0 '8'; 1 0 0 1 '9'; 1 0 1 0 'A'; 1 0 1 1 'B'; 1 1 0 0 'C'; 1 1 0 1 'D'; 1 1 1 0 'E'; 1 1 1 1 'F'];
fprintf(fid,'%s\n','ORG 0000H');
for j=1:16384,
X=[VGD_CN(j,2) VGID_CN(j,2) ];
Y=[VGD_BN(j,2) VGID_BN(j,2) VGD_AN(j,2) VGID_AN(j,2)];
for i=1:4;
    if X==[P1(i,1) P1(i,2)],
        v=P1(i,3);
    else
    end
end
for i=1:16;
    if Y==[P2(i,1) P2(i,2) P2(i,3) P2(i,4)],
        q=P2(i,5);
    else
    end
end
    fprintf(fid,'DB ');
    fprintf(fid,'%s%s%s\n',v,q,'H');
end
fprintf(fid,'%s\n','end');
st=fclose(fid);

```

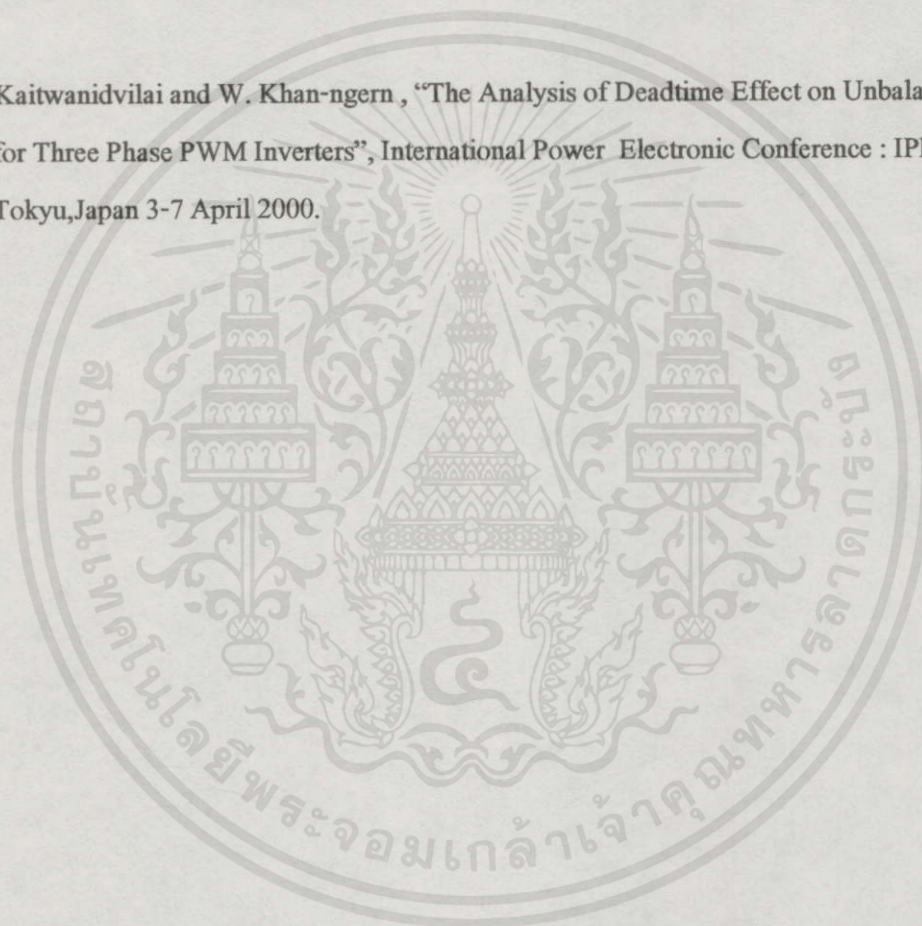
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

บทความที่ได้รับตีพิมพ์มีดังนี้

1. S.Kaitwanidvilai, J. Kaewchai and W. Khan-ngern, "Interactive Power Electronic Education" Proceeding of International Power Engineering Conference'1999 (IPEC'99), Singapore, 1999, pp.851-856
2. S.Kaitwanidvilai and W. Khan-ngern, "*PWM-CADI* An Interactive and efficient PWM Inverter Training Kit", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting (PES Winter 2000), Singapore, 24-27 January 2000
3. S.Kaitwanidvilai and W. Khan-ngern, "The Analysis of Deadtime Effect on Unbalanced Load for Three Phase PWM Inverters", International Power Electronic Conference : IPEC2000, Tokyu, Japan 3-7 April 2000.



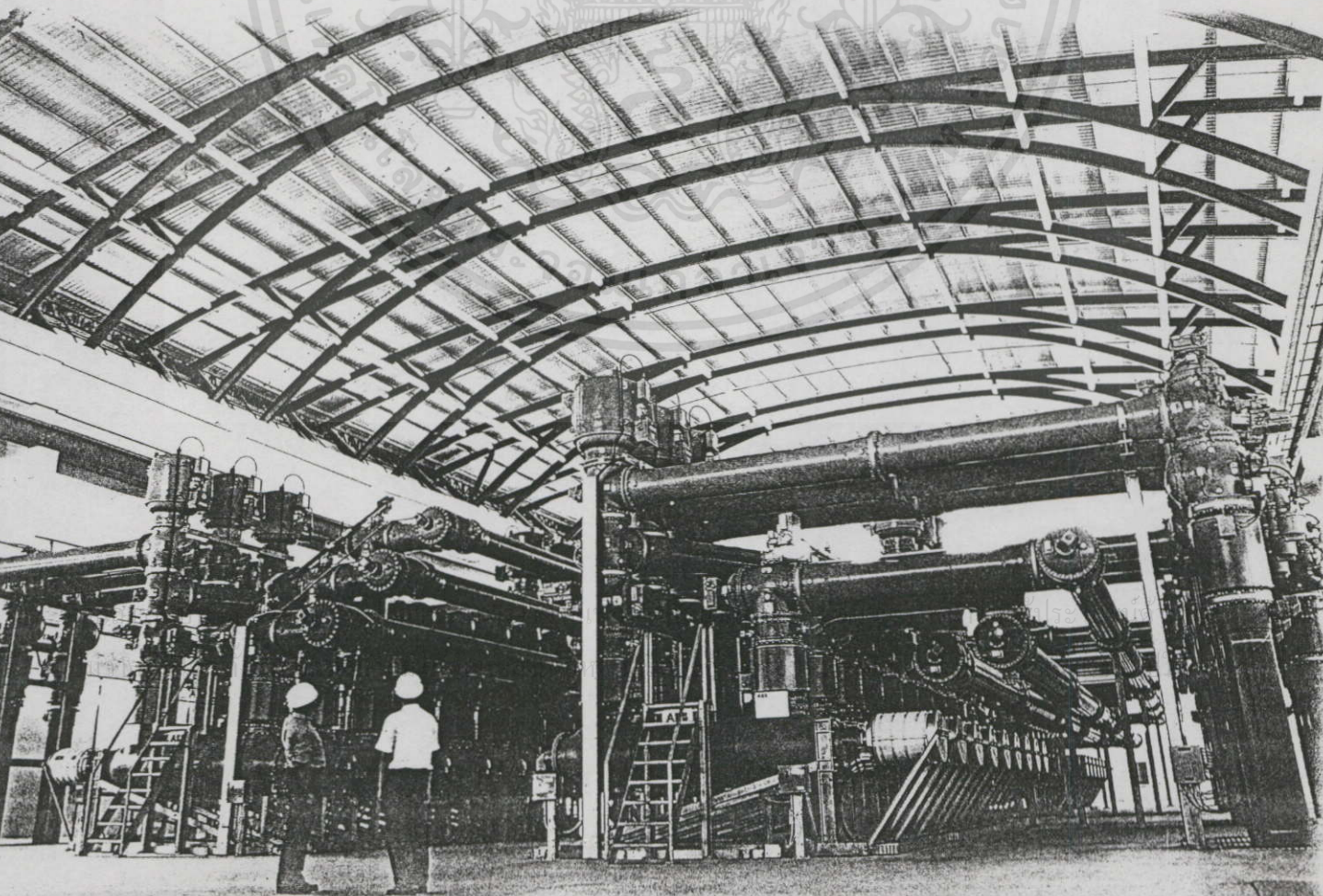
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IPEC '99

24 - 26 May 1999  
Mandarin Hotel Singapore

Proceedings of the  
**International Power  
Engineering Conference**

Volume II



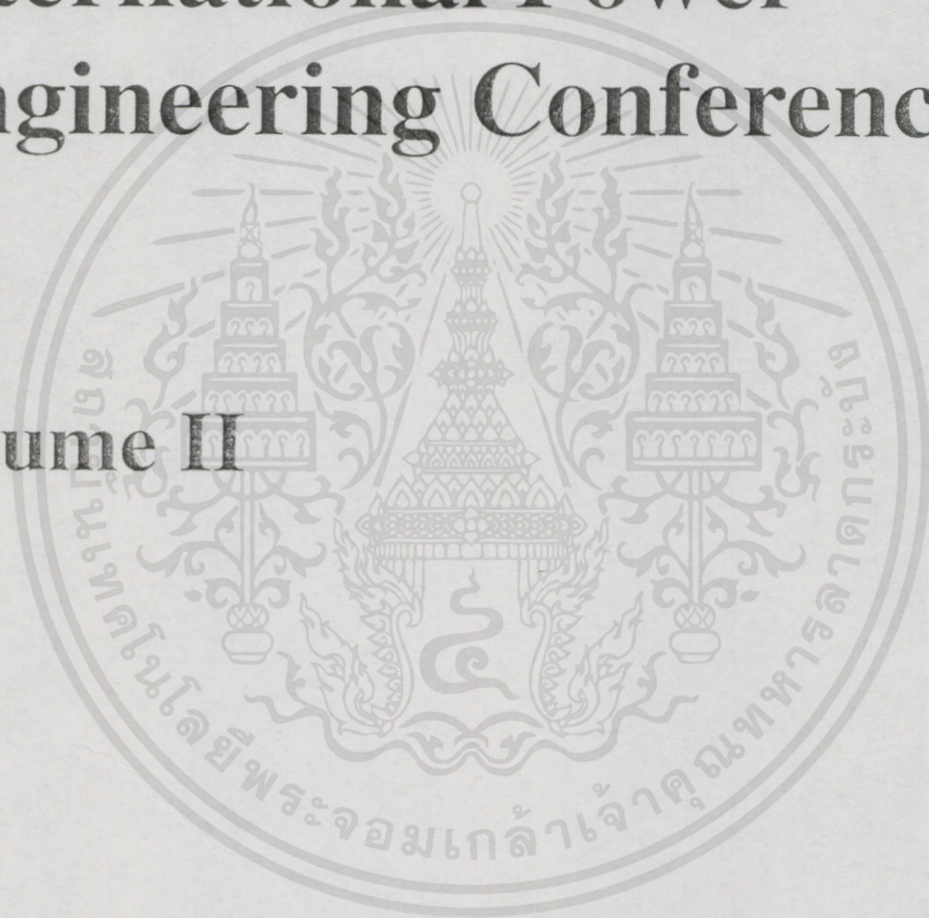
# IPEC '99

24 -26 May 1999

Mandarin Hotel Singapore

## Proceedings of the International Power Engineering Conference

### Volume II



#### ORGANISERS

- Nanyang Technological University
- IEE Singapore Centre
- Singapore Power Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Institution of Engineers, Singapore
- National University of Singapore

S. Kaitwanidvilai J. Kaewchai and W. Khan-ngern

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Chaokhunthaharn, Ladkrabang, (KMITL)  
Thailand**Abstract**

The presentation of inverter performance in visual, Matlab with Simulink program is used. The presentation shows the circuit, waveform, math equations of waveform, and inverter performance of switching patterns. The important point for this simulation program for education is that the students can interactively modify a load, modulation index, DC link voltage, voltage switching method (unipolar or bipolar switching) and also effect of dead time by themselves. Then waveform and all output properties are achieved by modifying input parameters. This advantage makes a good understanding and an effectively learning for students in the field of power electronics. Finally, The algorithms of program simulation as an interactive tool are arranged in good way for understanding.

**Keywords**

Interactive power electronics, Inverter education, PWM, THD.

**1 INTRODUCTION**

In power electronics, various switching patterns are widely employed to control the output of static power converter. Development of these switching techniques is rapidly growing, for example, from phase control to pulse width modulation(PWM). In PWM techniques, there are various types of switching patterns which have different characteristic output voltage, harmonic contents, voltage and current waveforms etc. Various techniques of PWM switching patterns are for instance, sinusoidal PWM(SPWM), Harmonics Injection PWM (HIPWM), Space Vector PWM (SVPWM) and Discontinuous PWM (DPWM) or dead band switching have been developed. In this paper, the simulation of waveform qualities, voltage and current spectrum are presented and arranged in program.

Nowaday the development of each switching technique is rapidly growing, therefore it's hard to study in properties of each technique. Several switching pattern are presented in [1] and [3]. However, most of them described the performance and modeling of switching pattern in the form of mathematical equations make it more difficult to learn and understand. This interactive education program was designed to help the process of learning and understanding the power electronic subjects. The studies of learning the performance and modeling of switching patterns by using mathematics

equations are difficult to students who are starting to learn in power electronics. Most of the students would like to have a user friendly program that help them to understand and enjoy to study. In this paper, the capabilities of this interactive program, input required and output from this program, block diagram and Simulink boxes are shown in the way that easy to understand and use. The first step of designing and writing the program, programmer must know and learn more about inverter performance, switching pattern technique and simulation program using MATLAB. The second step, the algorithms are arranged by programmer for easy useful and good understanding of the switching technique performance. Finally, the arrangement of simulation program and visual output are shown to present each switching pattern in visual. In this work, the interactive program to can help undergraduate students to learn in switching pattern performance by their own facilities.

**2 THEORY**

In this paper, SPWM, HIPWM, DPWM, and SVPWM are presented for selection in the simulation program. The development of switching pattern makes more good performance of output waveform qualities, for example, HIPWM (Harmonic Injection PWM) is PWM technique that is injected 3th harmonics to control signal. The advantage is increasing efficiency of output performance. The another switching patterns properties and the advantage can be seen in [4] for more details. Tables 1 and 2 show the summary of the mathematics model of patterns and definition of output performances that be studied before beginning to writing the program.

Table 1 :Output Inverter Performance Definitions

Value	Definition
$THD_i$	$\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h}}{I_1}$
$THD_v$	$\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h}}{V_1}$
$V_{I_{rms}}$	$(V_{peak})/\sqrt{2}$
$V_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h}$ (not include dc component)

$I_{rms}$	$(I_{peak})/\sqrt{2}$
$I_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$

Table 2 : Switching Patterns Mathematics Equations

Switching patterns	Model
SPWM	$M \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq 2\pi$
HIPWM	$\frac{2}{\sqrt{3}} M (\sin(\omega t) + \frac{a}{6} \sin(3\omega t))$ $: 0 \leq \omega t \leq 2\pi$
DPWM	$M \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq 2\pi/3$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \quad : 2\pi/3 \leq \omega t \leq 4\pi/3$
	$0 \quad : 4\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$
SVPWM	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq \pi/6$
	$M \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad : \pi/6 \leq \omega t \leq \pi/2$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad : \pi/2 \leq \omega t \leq 5\pi/6$
	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 5\pi/6 \leq \omega t \leq 7\pi/6$
	$M \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad : 7\pi/6 \leq \omega t \leq 3\pi/2$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad : 3\pi/2 \leq \omega t \leq 11\pi/6$
	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 11\pi/6 \leq \omega t \leq 2\pi$

Then  $M$  is modulation index

$V_h$  is peak voltage at harmonics order  $h$

$I_h$  is peak current at harmonics order  $h$

$THD_v$  is total harmonics distortion in voltage

$THD_i$  is total harmonics distortion in current

$a$  is magnitude constants of 3th harmonic

Method of current analysis in this paper use this concept: the voltage waveform produced by synchronous pulse width modulation is generated by comparing a reference waveform with a triangular wave. The output voltage waveform includes the deadtime or load current distribution which are the functions of the load power factor. The voltage and current harmonic is obtained by applying the Fast Fourier Transform (FFT) to the waveform generated by using the forward difference or prediction method. For a single phase inverter shown in Figure 1, the relation between  $v(t)$  and  $i(t)$  is expressed as in following equation :

For a single phase inverter, the voltage can be expressed as in equation (1).

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

The forward difference method is shown in equation (2)

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{\Delta t} \tag{2}$$

By using Equation (3), the load current can be calculated as Equation (3) show below.

$$v(t + \Delta t) = Ri(t + \Delta t) + \frac{L \{i(t + \Delta t) - i(t)\}}{\Delta t}$$

$$= Ri(t + \Delta t) + \frac{Li(t + \Delta t)}{\Delta t} - \frac{Li(t)}{\Delta t}$$

$$= i(t + \Delta t) \left[ R + \frac{L}{\Delta t} \right] - L \frac{i(t)}{\Delta t}$$

Thus,

$$i(t + \Delta t) = \frac{v(t + \Delta t) + \frac{Li(t)}{\Delta t}}{R + \frac{L}{\Delta t}} \tag{3}$$

Equation (3) expresses the effect of a R-L load on current commutation using this method. However, only the steady-state operation is of interest for this study. The next section describes the inverter simulation using MATLAB to generate voltage and current waveforms and their harmonic contents. For more detail see in appendix.

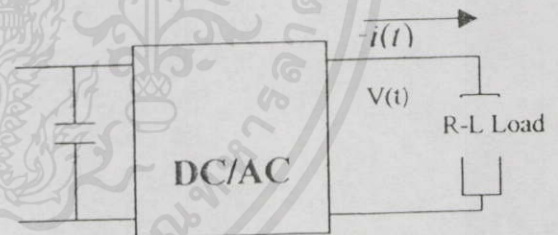


Figure 1 : A single phase Inverter

### 3 SIMULATION ALGORITHM

For clearly describes to simulation algorithm of this programs, Simulink box diagram in Figure 2 and Tables 3 and 4 are shown. When start to use these program, students necessary enter some required data as shown in Table 3 to Simulink of MATLAB and it will be processed to generate the matrix data file (.mat) that be used in MATLAB program. The MATLAB program (.m file) will process again and generated outputs that shown in Table 4. Tables 3 and 4 show the parameters of entered inputs and outputs respectively. The outputs would be shown in visual and clearly to understand.

4. EXAMPLE OF RESULTS

Various switching patterns simulation control signal are shown in Figure 2 that shows the different patterns at modulation index 0.8. This results come form the process as shown in Fig 2. Another results , Figure 3 shows the outputs waveforms and spectrum in various switching patterns at modulation index 0.8 at the input parameters. Tables 5 and 6 show the output values in various switching patterns agree well with theory value that can derived by mathematical equations.

Every outputs can be proved and verify with the theory, the results are in with agreement. All results in Tables 5 and 6 are calculated base on harmonics order 200<sup>th</sup>. That calculation results can vary by students to another range.

In case 1 phase can also modify by select in the Simulink box interface but not show in this paper. From example of results, it have seen  $THD_v$  value are large because PWM generate in this paper still not pass filter, That make students too understand in nature of PWM pattern.

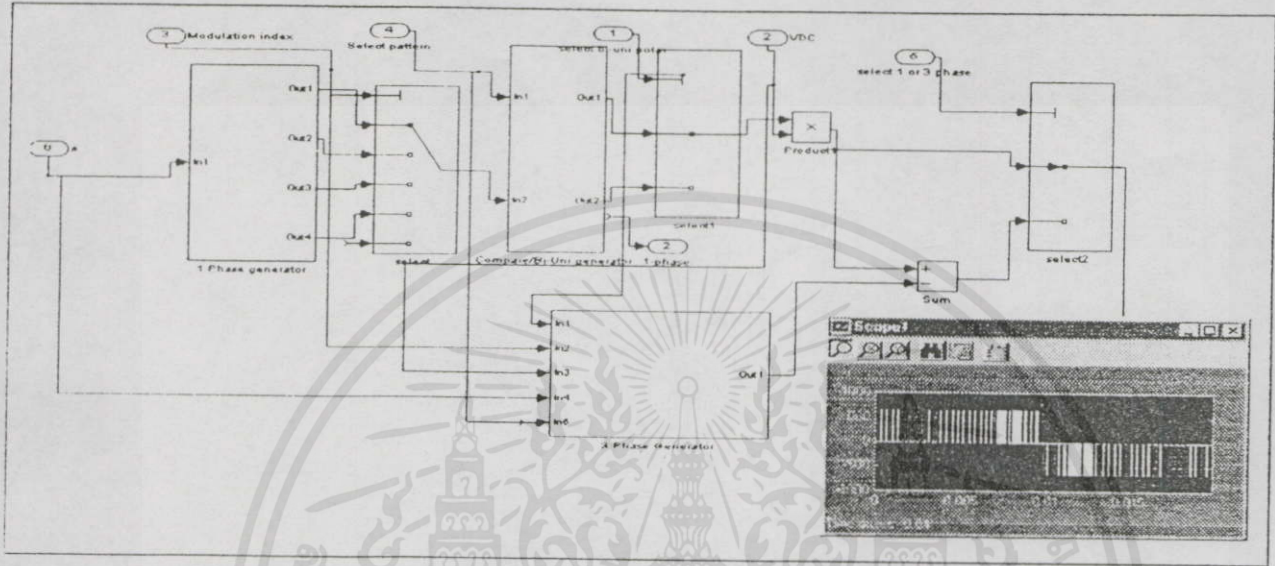


Figure 2 : Simulink Box to interface user

Table 3 : Input Parameters of Simulation Program

Switching Pattern	Switching Methods (Bi/Uni)	1-phase	3-phase	Modulation Index (0-overmod)	Deadtime (0-10 % of Ts)	DC link voltage (V)
SPWM	B/U	S	S	Xi	Xi	Xi
HIPWM	B/U	-	S	Xi	Xi	Xi
DPWM	B/U	S	S	Xi	Xi	Xi
SVPWM	B/U	-	S	Xi	Xi	Xi

Table 4: Output of Simulation Program

Patterns	$V_i$	$V_{rms}$	$I_i$	$I_{rms}$	$THD_i$	$THD_v$	V & I Spectra	V & I waveforms
SPWM	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	P	P
HIPWM	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	P	P
DPWM	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	P	P
SVPWM	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	Xo	P	P

B/U : select between bipolar or unipolar switching methods  
 S : select or not select Xi : Input value is changed by students.  
 Xo : output results. P : output waveform or frequency spectrum in picture.

Table 5 : Output Performance, results at the same input parameter as Figure 3,  $M = 0.8$

Patterns	$V_{irms}$	$V_{rms}$	$I_{irms}$	$I_{rms}$	$THD_i$	$THD_v$
SPWM	323.0	438.1	4.61	4.61	0.97	77.09
HIPWM	373.9	471.1	5.34	5.34	0.80	60.43
SVPWM	374.2	471.5	5.34	5.34	0.81	60.47
DPWM	374.0	471.0	5.34	5.34	1.07	69.23

Table 6 : Output Performance, results at the same input parameter as Figure 3,  $M = 0.5$

Patterns	$V_{irms}$	$V_{rms}$	$I_{irms}$	$I_{rms}$	$THD_i$	$THD_v$
SPWM	201.7	346.3	2.88	2.88	1.32	117.9
HIPWM	233.5	372.3	3.33	3.33	1.12	106.6
SVPWM	234.5	373.1	3.35	3.35	1.11	106.3
DPWM	233.9	373.2	3.34	3.39	1.92	112.2

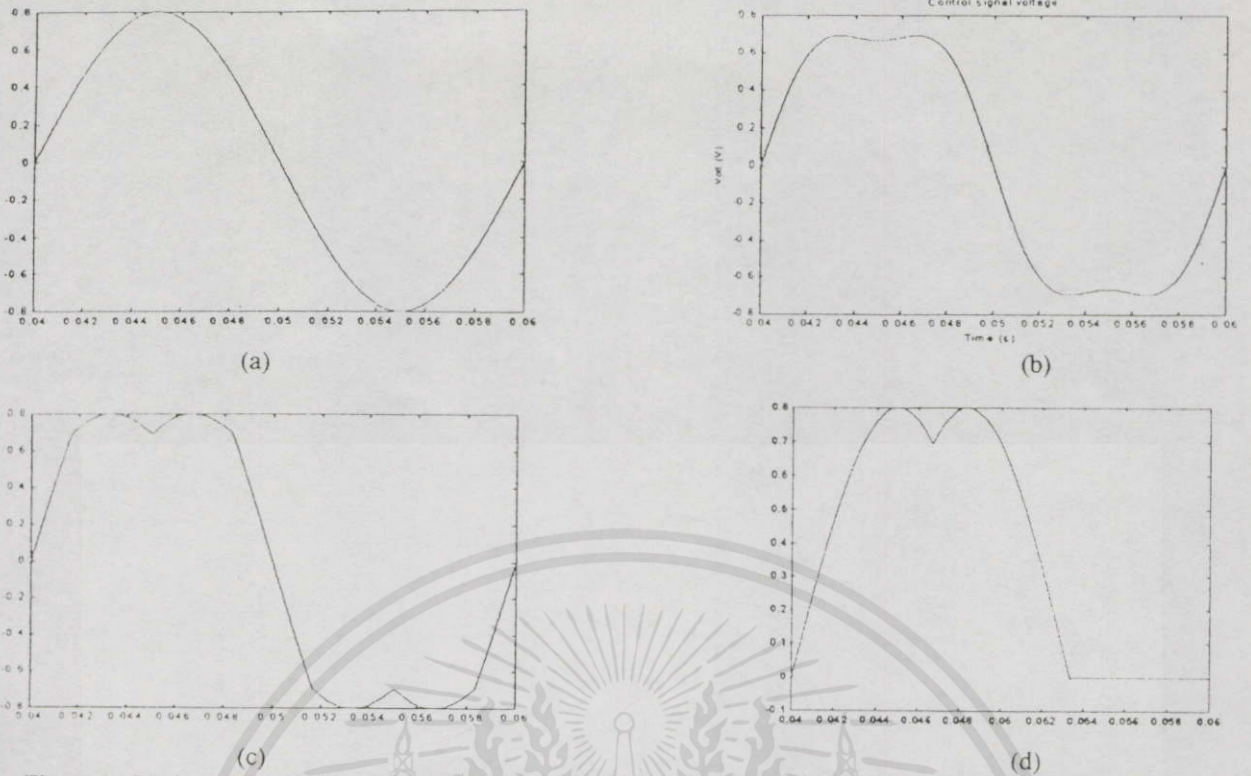


Figure 2 : Various control signal at modulation index 0.8 (a) SPWM (b) HIWM (c) SVPWM (d) DPWM

Input parameter at operating conditions:  $V_{dc} = 658$  Volt, Switching Pattern : Unipolar, Phase : 3 Phase Y connection, Dead time : 0 Carrier frequency = 3 kHz, Power factor=0.5, Load impedance= $70/\sqrt{3}$  ohms, Control signal frequency = 50 Hz, Modulation index = 0.8

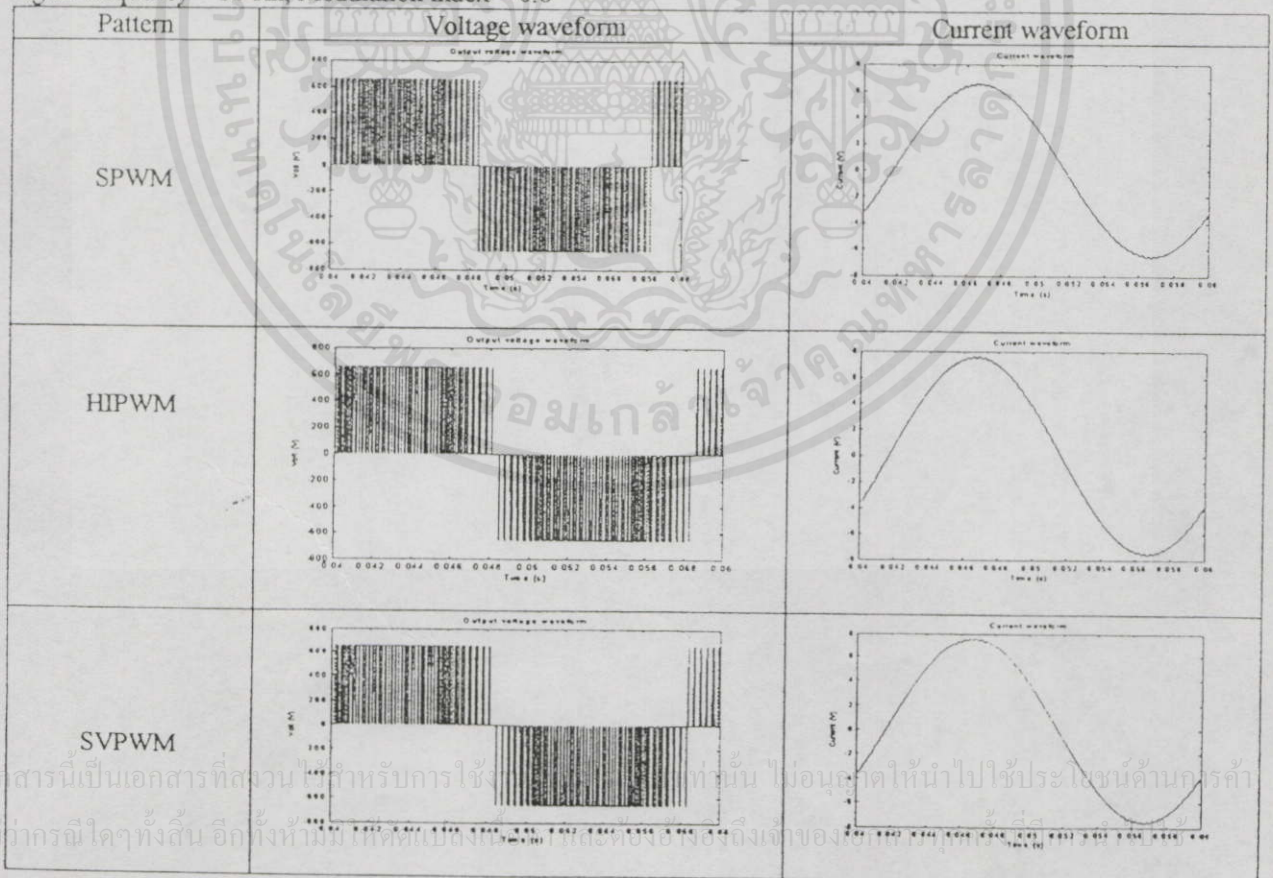


Figure 3 : Simulation waveform in various switching pattern

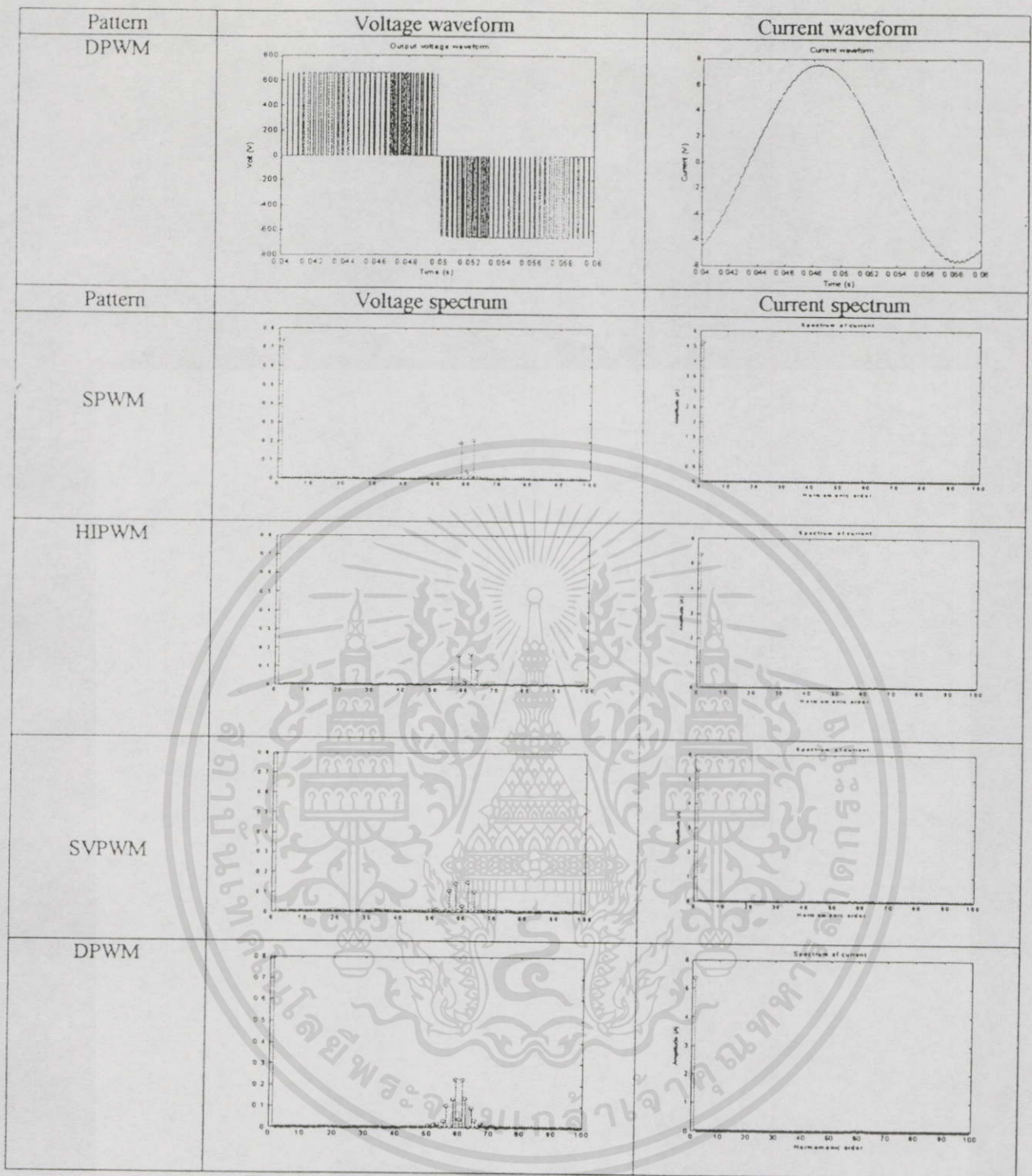


Figure 3 : Simulation waveform in various switching pattern.

In the results, it can be seen that HIPWM, SVPWM, and DPWM voltage output are about 15% more than that SPWM. That is one of their advantages.

Figure 4 is shown the effect of dead time, it can see that harmonic order near the fundamental are generated by this effect. The error voltage generated by dead time effect is shown in equation(4).[5]

$$\text{Error voltage} = V_{ideal} - V_{actual} \quad (4)$$

$$= \begin{cases} \frac{2t_d}{T_s} V_d & \text{if } i > 0 \\ \frac{2t_d}{T_s} V_d & \text{if } i < 0 \end{cases}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (5)

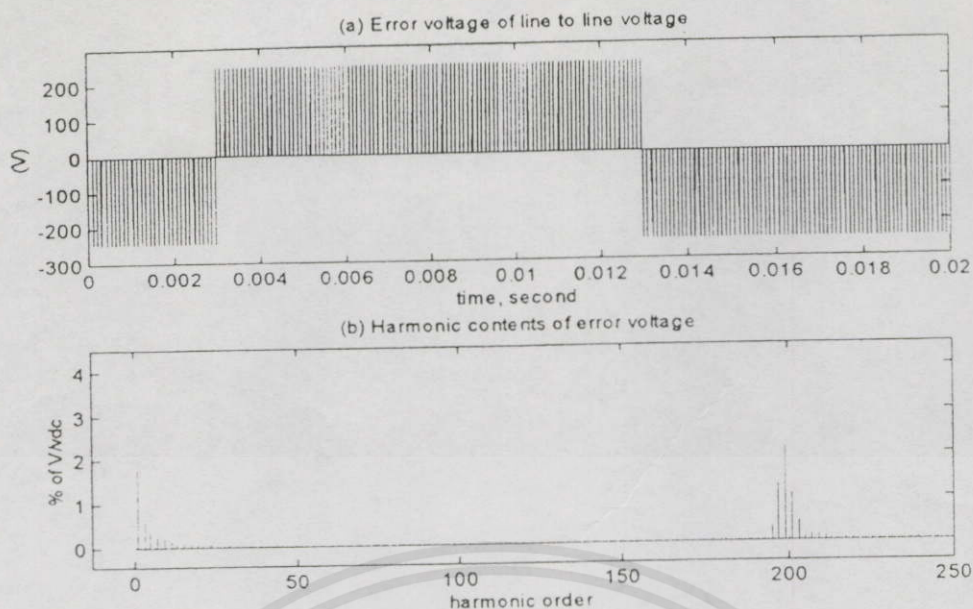


Figure 4 Impact of deadtime in single phase SPWM, deadtime = 1.0% of  $t_s$

The example of the result of dead time impact on SPWM shown in Figure 4 shows the error voltage waveform at deadtime = 1.0% of  $t_s$  (switching period). This figure is shown both error voltage and frequency spectrum of waveform that effected by deadtime.

## 5 CONCLUSIONS

The user friendly simulation program for the understanding and effective leaning in field of power electronics is proposed. Interactive tool is arranged in such as way for better understanding. It would help independent learning. This interactive program is suitable for undergraduate level using at faculty of Engineering, KMITL. For the future work, the device effect will be included in the next simulation version.

## APPENDIX

Some parts of MATLAB program used in Figure 2:

```
....%Find Current
pf=0.5;
Z=70;
angle=acos(pf);
R=sqrt(1/(1+(tan(angle)^2)));
L=(sqrt(1-R^2))/(2*pi*50);
step=0.0000048828125;
%step=0.02/m
tf=0.02;
t=0:step:tf;
XL=2*pi*50*L;
Zt=Z*(sqrt(R^2+XL^2));
angle1=atan(XL/R);
I=1*(sin(-angle1))/(Zt*sqrt(2)); V=V/Z;
```

```
IINC=V;
TS=0;
for q=1:(tf/step)+1
IINC(q)=(V(q)+L*I/step)/(R+L/step);
TS=TS+step;
T(q)=TS;
I = IINC(q);
end
iteration
```

## REFERENCES

- [1] V. A. Agelidis, P. D. Ziogas, and G. Joos. *Dead-Band PWM Switching Patterns*, 23rd Annual Power Electronic Specialists Conf. Toledo, pp. 247-243, 1992.
- [2] F. Blaabjerg, U. Jaeger, S. Munk-Nielsen, and J. K. Pedersen. *Power losses in PWM-VSI inverter Using NPT or PT IGBT Devices*. IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 10, No. 3, pp. 358-367, 1995.
- [3] A. Boglietti, G. Griva, M. Pastorelli, F. Profumo, and T. Adam. *Different PWM Modulation Technique Indexes Performance Evaluation*. ISIE'93 Budapest, pp. 193-199, 1993.
- [4] M. Boost and P. D. Ziogas. *State of the Art PWM Techniques: A Critical Evaluation*. IEEE Trans. on Ind. Applications. No. 2, pp. 271-280, 1988.
- [5] Mohan, Undeland and Robbin. *Power electronics, Converter Applications, and Design*. 2nd editor, John-Wiley, pp 231-232

ไม่ทำการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dr. W. Khan-ngern  
Dept. of EE  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Inst. of Tech.  
Ladkrabang  
Bangkok, 10520 Thailand

PAPER NUMBER: 2000WM-541

PAPER TITLE: PWM-CAD1: An Interactive and Efficient PWM Inverter Training Kit

FIRST AUTHOR: Kaitwanidvilai, S.

Dear Author:

We are pleased to inform you that your paper has been accepted and is scheduled for presentation at the 2000 Winter Meeting. The Advance Program which has been mailed is also posted on the PES website: <http://www.ieee.org/power> and can be consulted for scheduling details. Please check the final program for any scheduling changes.

On behalf of the Technical Program Committee, may we cordially invite you, as a presenter, to attend a Breakfast on the morning of your session. This will permit Session Chairs and presenters to meet to finalize any pending arrangements. Breakfast will be served Monday through Thursday. Details will be available in the final program.

A copy of the IEEE/PES Technical Session Guide for the Author and Guidelines for Slides, Overheads and Posters is available through the PES web Site: <http://ieee.org/power>. If you are unable to download the guide please contact the PES Executive Office for a hard copy.

On behalf of the IEEE Power Engineering Society, may I express our appreciation for your participation in this meeting.

Sincerely,  
Carol Lund  
Senior Administrator  
PES Executive Office  
(732) 562-3882  
[c.lund@ieee.org](mailto:c.lund@ieee.org)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PWM-CAD1: An Interactive and Efficient PWM Inverter Training Kit

S. Kaitwanidvilai

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMUTT) Chalokkrung Road, Bangkok, 10520, Thailand

W. Khan-ngern, member IEEE

**Abstract:** In this paper, the presentation of inverter performance in visual, Matlab with Simulink program and EPROM digital control circuit are used as the computer aid training, simulation and designation which called as PWM-CAD1 kit. The presentation shows the circuit, waveform, mathematics equations of waveform, and inverter performance of switching patterns in the both of simulation and practical results included in PWM-CAD1. The important point of this kit for education is that the students can interactively modify overall necessary parameter of inverter design. The all output properties and waveform are clearly shown both of simulation results and practical waveform on the inverter circuit in the kit. Finally, this kit will be used as an interactive tool that arranged in good way for learning, designation and simulation.

**Keywords:** PWM Inverter, *THD*, Inverter Performance, computer aid design and simulation

## I. INTRODUCTION

In power electronics, various switching patterns are widely employed to control the output of static power converter. Development of these switching techniques is rapidly growing, for example, from phase control to pulse width modulation (PWM). In basic concept, the triangle intersection technique, the reference voltage (modulate) waveform are compared with the triangle carrier wave and the intersections define the switching instants. In PWM techniques, there are various types of switching patterns which have different output characteristic. Various pulse width modulation (PWM) techniques are rapidly modified to control the power converter meet the highest efficiency performances. Example of popular patterns are sinusoidal PWM (SPWM), harmonics injection PWM (HIPWM), modified sinusoidal PWM (MPWM), space vector PWM (SVPWM), discontinuous PWM (DPWM) and Generalized Discontinuous PWM (GDPWM). The performance analysis of these patterns by mathematics is complexity which is not suitable to develop the new patterns. The voltage and current patterns are not exactly due to some of effects. Some of errors come from the following effects.

1. Deadtime effect which causes by the time delay of driving signal of the same branch of switching device.
2. Quantization effect in digital hardware/software implementation.
3. Device effect: Specified by characteristic of the switching device.

In this paper, MATLAB program and Simulink toolboxes are applied to analysis switching pattern, waveform quality including of errors from the deadtime effect and quantizing errors. Many advantages from using MATLAB program are concluded in following:

1. User friendly for design engineer or student to analysis and change parameters of switching pattern, Modulation Index, DC link voltage, %deadtime, loads, switching method, switching frequency.

2. Simplicity for Computer Aid Design.

3. Including the deadtime effect and quantizing errors.

4. Direct transform simulated output from MATLAB program to gate control signals. Only use this simulation program, the driving signal of switching can be performed into the format of binary file or hex file that make it's very simple to be used this file compatible with microcontroller or digital control circuit such as EPROM of PWM inverter controller. Therefore the data file from simulation can be used as the digital pattern into EPROM in the digital control circuit.

In addition, by using the current waveform prediction theory then the program can calculate the current waveform and qualities which load impedance and power factor are given.

## II. THEORY

In this paper, SPWM, HIPWM, DPWM60, SVPWM and GDPWM are selectable in the simulation program. The development of switching pattern introduced a good performance of output waveform qualities, for example, HIPWM (Harmonic Injection PWM) is PWM technique that is injected 3th harmonic to control signal. The advantage is increasing output amplitude by 15% of SPWM. The another switching patterns properties and the advantage can be seen in [1-4]. Many researchers perform the switching pattern into mathematics equations as shown in Table 1. However, most of them described the performance and modeling of switching pattern in the form of mathematical equations is not easy to understand. Table 2 shows the summary of the definition of output performances index. Using the MATLAB toolboxes, the concept of triangle intersection PWM can be simplicity and user friendly for development the new patterns. Output properties index shown in Table 2 are described and identified the characteristics of each switching patterns.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 : Example of Switching Patterns Mathematics Equations

Switching patterns	Mathematics Model
SPWM	$M \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq 2\pi$
HIPWM	$M(1.15 \sin(\omega t) + 0.19a \sin(3\omega t))$ $: 0 \leq \omega t \leq 2\pi$
DPWM	$M \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq 2\pi/3$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \quad : 2\pi/3 \leq \omega t \leq 4\pi/3$
	$0 \quad : 4\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$
SVPWM	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 0 \leq \omega t \leq \pi/6$
	$M \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad : \pi/6 \leq \omega t \leq \pi/2$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad : \pi/2 \leq \omega t \leq 5\pi/6$
	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 5\pi/6 \leq \omega t \leq 7\pi/6$
	$M \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad : 7\pi/6 \leq \omega t \leq 3\pi/2$
	$M \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \quad : 3\pi/2 \leq \omega t \leq 11\pi/6$
	$M\sqrt{3} \sin(\omega t) \quad : 11\pi/6 \leq \omega t \leq 2\pi$

Table 2 :Output Inverter Performance Definitions

Value	Definition
$THD_i$	$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} / I_1$
$THD_v$	$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} / V_1$
$V_{1rms}$	$(V_{peak}) / \sqrt{2}$
$V_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$
$I_{1rms}$	$(I_{peak}) / \sqrt{2}$
$I_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$
$DF_1$	$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / h^2} / V_1$
$DF_2$	$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / h} / V_1$

Then  $M$  is modulation index

$V_h$  is peak voltage at harmonics order  $h$

$I_h$  is peak current at harmonics order  $h$

$THD_v$  is total harmonics distortion in voltage

$THD_i$  is total harmonics distortion in current

$a$  is magnitude constants of 3th harmonic

$DF_1$  is distortion factor for second order ac side filter

$DF_2$  is distortion factor for first order ac side filter

Voltage waveform produced by synchronous pulse width modulation is generated by comparing a reference waveform with a triangular wave[5]. The output voltage waveform includes the deadtime or load current distribution which are the functions of the load power factor. Current waveform is generated by forward difference method[5]. Fast Fourier Transform (FFT) is used to performs the spectra of voltage and current waveform. For making simple understanding this method, a single phase inverter is used to described as shown in Figure 1, the relation between  $v(t)$  and  $i(t)$  is expressed as in following equation [5]:

Using the simple circuit analysis theory, the voltage  $v(t)$  can be expressed as in Equation (1).

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

The forward difference method is shown in Equation (2)

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{dt} \tag{2}$$

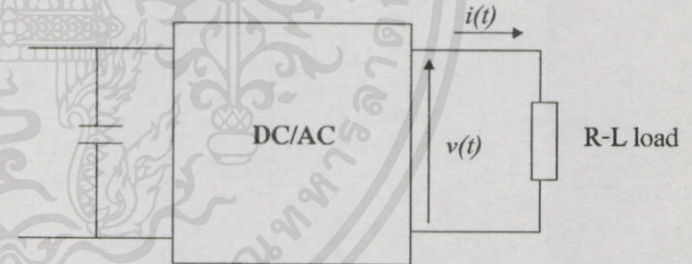


Figure 1 : A single phase Inverter

By using Equation (2), the load current can be calculated as Equation (3) show below.

$$\begin{aligned}
 v(t + \Delta t) &= Ri(t + \Delta t) + \frac{L \{i(t + \Delta t) - i(t)\}}{dt} \\
 &= Ri(t + \Delta t) + \frac{Li(t + \Delta t)}{dt} - \frac{Li(t)}{dt} \\
 &= i(t + \Delta t) \left[ R + \frac{L}{dt} \right] - L \frac{i(t)}{dt} \tag{3}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thus,

$$i(t + \Delta t) = \frac{v(t + \Delta t) + \frac{Li(t)}{dt}}{R + \frac{L}{dt}} \tag{3}$$

Equation (3) expresses the effect of a R-L load on current commutation using this method. However, only the steady-state operation is of interest for this study.

The deadtime effect analysis is clearly shown in [6] that effect to the waveform in the produce of low order harmonics. In [6] uses the estimated error voltage in Equation (4)

$$\text{Estimated Error voltage} = \begin{cases} 2t_{\Delta}V_d / T_s & \text{if } i > 0 \\ -2t_{\Delta}V_d / T_s & \text{if } i < 0 \end{cases} \tag{4}$$

The deadtime effect are simply to be analyzed by actual error voltage by using Equation (5) which give more correction than Equation (4).

$$\text{Error voltage} = V_{ideal} - V_{actual} \tag{5}$$

### III. ALGORITHMS

The algorithm of simulation in PWM-CAD1 are shown in Figure 2. Users can put the value of overall necessary parameter for simulation or design such as Vdc link, type of switching patterns, switching frequency etc. Then the simulation part of PWM-CAD1 will process the simulation results such as voltage and current waveform, voltage and current spectra, distortion factor etc. The overall of input data and output simulated results from this simulation of PWM-CAD1 are shown in Table 3 and 4 respectively. PWM-CAD1 generate the control data from simulation into metrics file and convert to hex or assembly file for using as the control circuit of PWM inverter circuit. If the users have known the impedance and phase impedance of load connected to output of inverter, value of these impedance and phase angle are able to put into program for current waveform prediction purpose. For three phase inverter, the connection of three phase load (delta or star) also must be known. Using FFT (Fast Fourier Transform) function in MATLAB, overall simulation results are converted to the frequency domain. Then, overall quality index such as  $DF_1$ ,  $DF_2$  etc. are be determined. Finally, the error voltage and spectra from deadtime effect are simulated by using the deadtime analysis concept. Example of user interface window of PWM-CAD1 are shown in Figure 3.

The input program blocks are arranged in the good way shown in Figure 3. One of advantage of MATLAB, it can interface with modern operating system such as Microsoft

Window 95. User can double click the mouse and change the overall input data. Figure 4 shows the program box of reference pattern. User can add the new one mathematics equation of switching pattern into this box, the overall outputs of the new switching pattern also simulated and determined by PWM-CAD1. That make a good way and simplicity for user to modified or develop the new switching patterns.

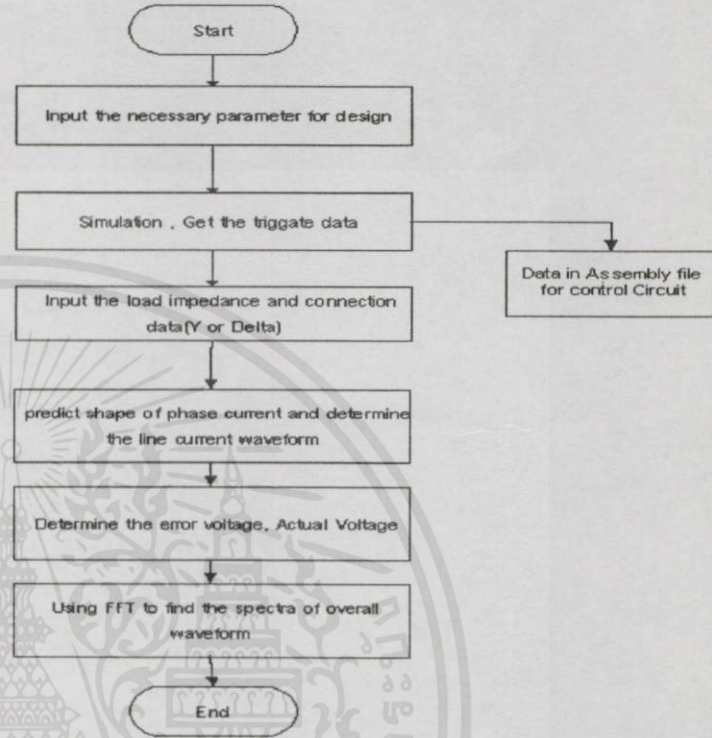


Figure 2 Simulation flow chart

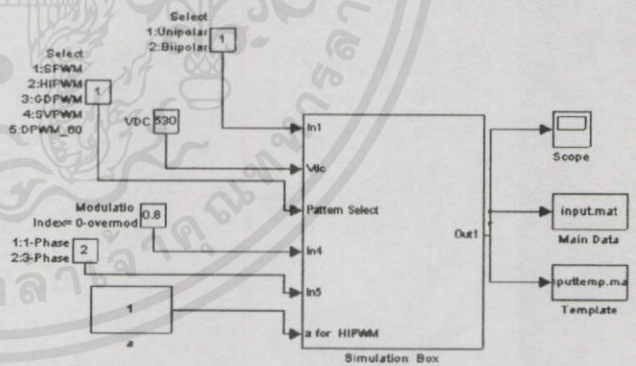


Figure 3 Example of Simulation User Interface of PWM- CAD1

### IV. EXPERIMENTAL AND CIRCUITS

The simple three phase inverter circuit is used as the experimental parts in PWM-CAD1. The inverter and control circuit are shown in Figure 5. In control circuit, EPROM (64 Kbytes, 27C512) is directly used as the source of 6 gate drive signals. The gate trigger data of EPROM

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

come from the simulation results (hex file) of PWM-CAD1 which already include the deadtime. One bit of data out of EPROM is used as one trig gate signal for switching driver of MOSFET. Therefore, 6 gates use 6 bit of data in EPROM. This topology make a simple and low cost for implement the overall output characteristics.

read the measured data file and convert it to the frequency domain value by using function FFT. Then the voltage and current spectra of measured results can be shown by a simulated process. Simulated and calculated from measured data of waveform quality index are shown in Table 5.

Table 3 : Input Parameters for PWM-CAD1

Switching Pattern (selectable)	Switching Methods (Bi/Uni)	1-phase	3-phase	Modulation Index (0-overmod)	Deadtime (0-10 % of Ts)	DC link voltage (V)
SPWM,HIPWM, DPWM 60, DPWM 120, GDPWM, SVPWM	B/U	S	S	Xi	Xi	Xi

Table 2: Output of PWM-CAD1(Simulation and Practical Results)

Select Patterns	$V_{rms}$ $V_l$	$I_{rms}$ $I_l$	Assembly file	$THD_v$ $THD_l$	$DF_1$ $DF_2$	V & I Spectra	V & I waveforms
SPWM,HIPWM, DPWM 60, DPWM 120, GDPWM, SVPWM	Xo	Xo	File	Xo	Xo	P	P

B/U : select between bipolar or unipolar switching methods File : hex or assembly file.  
 S : select or not select Xi: Input value is changed by users.  
 Xo : output results. P : output waveform or frequency spectra in picture.

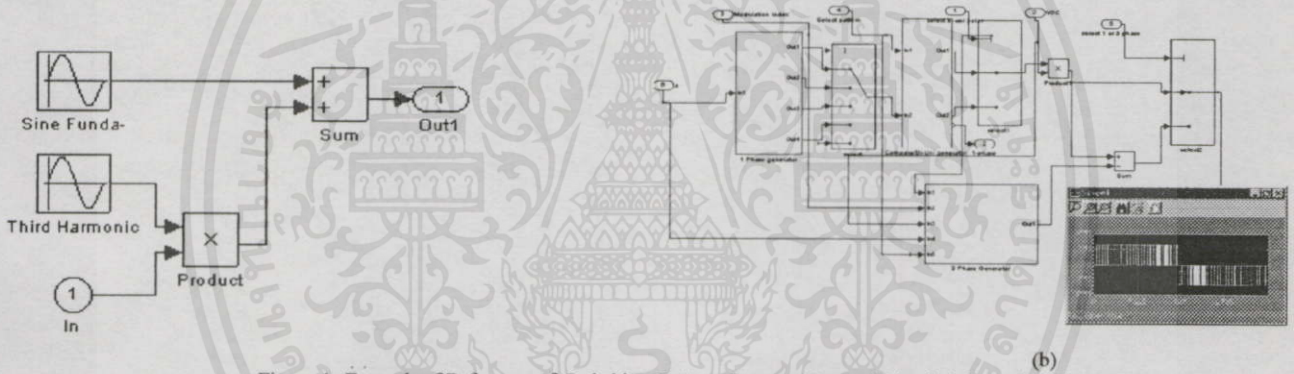


Figure 4 Example of Reference of Switching Patterns Program Box and Simulink Box of PWM-CAD1 (a) Harmonic Injection PWM Box (b) Main Simulation Box

In the case of single phase inverter, only T1-T4 are used for the circuit and R-L load will be connected at the A and B terminal. The control circuit of this case are the same of three phase. The trig gate data must come from one phase selected simulation of PWM-CAD1.

V. SIMULATED AND MEASURED RESULTS

The example of simulated and measured results are shown in Figure 6. For example, the techniques SPWM, SVPWM and GDPWM are used to implement the performance of PWM-CAD1 for the computer aid design and simulation. In this paper, measured data of time domain waveform (both current and voltage waveform) which are in the format data file(.DAT) are measured by using the digital oscilloscope. The measurement can

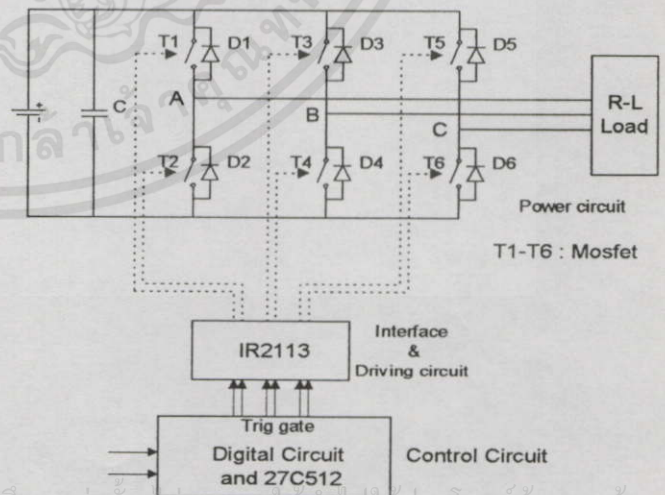
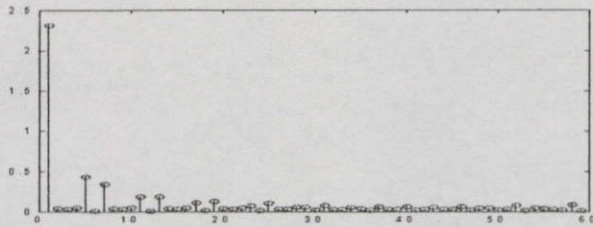


Figure 5 Inverter Power and Control Circuit

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

All properties from the simulated and measured results are good agreement. Figure 7 show the simulation results of deadtime effect in three phase and single phase inverter circuit.



(a)

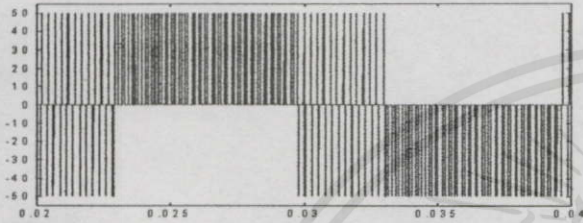


Figure 7 Deadtime error voltage simulation results of SPWM the same conditions of Figure 6.

(a) spectra (b) Voltage error waveform

Table 5 Example of quality index at the same condition of Figure 6

#### Simulated Results

	$THD_v$	$V_{1rms}$	$V_{rms}$	$DF_1(\%)$	$DF_2(\%)$
SPWM	67.92	24.46	32.55	0.07	0.42
SVPWM	55.96	28.25	35.09	0.08	0.37
GDPWM	52.52	31.14	37.05	0.12	0.49

#### Measured Results

	$THD_v$	$V_{1rms}$	$V_{rms}$	$DF_1(\%)$	$DF_2(\%)$
SPWM	67.34	24.91	32.48	0.13	0.30
SVPWM	55.33	28.77	35.17	0.06	0.19
GDPWM	51.78	31.65	37.21	0.13	0.40

In the results, it can be seen that HIPWM and GDPWM has voltage output are about 15% more than that of SPWM. That is one of their advantages.

According to the measured and simulated results, the overall results are in good agreement. It will be shown that PWM-CAD1 is successful for use as Computer Aid design, training or simulation.

## VI. CONCLUSION


In this paper, PWM-CAD1 is introduced as the kit of computer aid design, training and simulation of the performance of inverter circuit. The simulated and measured results are good agreement and show the successful of the using of PWM-CAD1 for simulation or designation purpose. Using this program, users can easily

to simulate and implement on inverter circuit which arranged in simple and efficiently for implement. However, the device effect of switching device are not included in the simulation of this program. The development of device effect including are in the future work.

## VII. REFERENCES

- [1] V. A. Agelidis, P. D. Ziogas, and G. Joos, "Dead-Band PWM Switching Patterns," IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 11, No. 4, 1996., pp. 522-531.
- [2] F. Blaabjerg, U. Jaeger, S. Munk-Nielsen, and J. K. Pedersen, "Power losses in PWM-VSI inverter Using NPT or PT IGBT Devices," IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 10, No. 3, 1995, pp. 358-367.
- [3] A. Boglietti, G. Griva, M. Pastorelli, F. Profumo, and T. Adam, "Different PWM Modulation Technique Indexes Performance Evaluation," ISIE'93 Budapest, 1993, pp. 193-199.
- [4] M. Boost and P. D. Ziogas, "State of the Art PWM Techniques: A Critical Evaluation," IEEE Trans. on Ind. Applications. No. 2, 1988, pp. 271-280.
- [5] W. Khan-ngern, "The Analysis and Evaluation of Pulse Width Modulation Techniques for Converters," Ph.D. Thesis, Imperial College of and Technology and Medicine. UK 1997.
- [6] Mohan, Undeland and Robbin, Power electronics, Converter Applications, and Design. 2nd editor, John-Wiley, p 231-232.

## VIII. BIPGRAPHIES



Dr. W. Khan-ngern, born in 1960, in Ubonratchthani, Thailand. He received the degree of B. Eng. and M. Eng. from KMITL in 1982 and 1988 respectively. He joined the Royal Thai Army for 7 years before became a member of Electrical Department of KMITL. He then continued his degree at Imperial Collage, University of London and obtained Ph.D. and DIC in 1997 in the area of power electronics. He has been promoted to be an Assistant President for academic affairs of KMITL in 1998. He also a technical committee no 890 : in EMC for Ministry of Industry and a technical committee no 23 : Electronic Ballast for Thai Green Label & Ministry of Industry. Dr. W. Khan-ngern continues his research in the area of EMI & EMC, Photovoltaic systems and power electronics system.



Mr. Somyot Kaitwanidvilai, born in 1977, in Pichit, Thailand. He received the degree of B. Eng. from KMITL in 1996. He joined the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) in 1998. Now he is a student in Master Degree at KMITL. His research in the area of power electronics and computer aid design.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IPEC-Tokyo 2000

## International Power Electronics Conference

April 3-7, 2000  
Keio Plaza Hotel, Shinjuku, Tokyo, Japan

Sponsored by

**The Institute of Electrical Engineers of Japan**

**Please do registration before Feb.14th, and save your money!**



IPEC will be held in Tokyo during April 3 - 7, 2000. This is the fourth in a series of International Conferences on Power Electronics.

The 1st IPEC was at Keio Plaza, Tokyo in April 1983

The 2nd IPEC was at Keio Plaza, Tokyo in April 1990

The 3rd IPEC was at Pacifico Yokohama, Yokohama in April 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

The IPEC-Tokyo will provide a unique opportunity for engineers, researchers and academia to meet in the central Tokyo and to exchange the up-to-date information on power electronics, motor drive, motion control and related subjects.

# The Analysis of Deadtime Effect on Unbalanced Load for Three Phase PWM Inverters

Somyot Kaitwanidvilai and Werachet Khan-ngern

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL) Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520,  
Thailand

## Abstract

This paper presents an analysis of deadtime effect on unbalanced load for three phase PWM inverters. The actual error voltage of unbalanced is shown that it is depend upon not only load current direction, dc link voltage but also amplitude and phasor of the load. The simulated and measured results for harmonics injection PWM and discontinuous PWM are analyzed with 4.88  $\mu$ s deadtime of 2% of switching time which is shown close agreement between both of results with a good support from the analysis.

## 1. Introduction

Pulsewidth Modulated (PWM) switching patterns in power electronics are rapidly developed. PWM techniques have different characteristic output voltage, harmonic contents, voltage and current waveforms etc.[1-6] Various techniques of PWM switching patterns are, for instance, sinusoidal PWM (SPWM), Harmonics Injection PWM (HIPWM), Space Vector PWM (SVPWM) and Discontinuous PWM (DPWM) or dead band switching. Generalized Discontinuous PWM (GDPWM) have been developed. However, in the practical works, the performance depends on not only switching patterns but also device effect and deadtime effect at different load conditions. This work is focused on deadtime effect at balanced and unbalanced load. The reason is that it has some practical effects give the errors such as error from deadtime effect. It has been already described the error from this effect in [7]. However, the error voltage which presented by earlier work using the square or quasi waveform (estimated error voltage) is not actual error. The actual error voltage is the pulse between the deadtime interval depending on the direction of current. The actual error voltage is not only depend on this effect but also depended on unbalanced. Line-to-line voltage and phase current are focused. The analysis of actual error voltages is consisted of various type of PWM techniques, the error pulse analysis (actual error voltage) and complexity of unbalanced load.

In this paper, the analysis and implementation on deadtime effect on unbalanced load for three phase PWM inverter are presented. The simulated results show the performance of various switching patterns of error voltage on balanced/unbalanced load. The analysis is performed by using MATLAB program and Simulink

toolboxes to analyze on waveform quality and overall voltage/current waveform and spectra. It is simplified with an interactive analysis which is included the deadtime effect and sampling waveform process. The current prediction methods and the circuit analysis, the unbalanced deadtime effect analysis using the star-to-delta impedance transformation are proposed in this MATLAB simulation program. The output of this algorithm program gives all waveform qualities, performances and error voltage from balanced/unbalanced load deadtime effect. The comparison of program simulation and experimental results are quite clearly shown. All simulation results are verified on an experimental unit.

## 2. Theory

The approximate deadtime effect error voltage is already shown in [7]. In single phase inverter, the deadtime error voltage in one branch of inverter switch circuit is shown by using equation (1).

$$\begin{aligned} \text{Approximated Error voltage} &= 2t_d V_{dc} / T_s \quad \text{if } i > 0 \\ &- 2t_d V_{dc} / T_s \quad \text{if } i < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Then  $n$  is the order of harmonics.,

$V_{dc}$  is DC link voltage,  $t_d$  is the deadtime and  $T_s$  is the switching time.

In three phase inverter circuit, the approximated error voltage can be determined by the different of error voltage from phase a (branch a) and phase b (branch b) which has normally phase shift equal to 120 degree (in balanced load). The three phase inverter circuit is shown in Fig. 1. The results of approximated error voltage in three phase inverter is seem as quasi-square waveform.

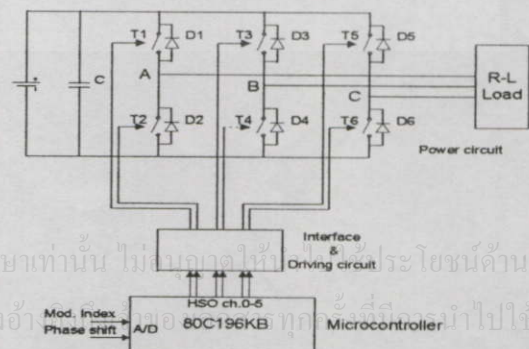


Figure 1 Experimental Diagram

The expression for the harmonics of peak value of fundamental frequency in SPWM line voltage of single phase introduced by the deadtime can be concluded as [8].

$$(\hat{V}_{ab,approximated\ distortion})_n = \frac{t_d}{T_s} 2V_{dc} \left\{ \frac{4}{\pi n} \right\} \quad (2)$$

The expression for the harmonics of peak value of fundamental frequency of SPWM, HIPWM and SVPWM in line voltage of three phases are shown in equation (3) [8].

$$V_{ab,approximated\ distortion} = \frac{t_d}{T_s} V_{dc} \left[ \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos[(6n+1) \cdot (\alpha - \frac{\pi}{3} - \phi)] \cdot \sin[\frac{(6n+1) \cdot \pi}{3}]}{(6n+1)} \right] \quad (3)$$

Then  $\phi$  is the phase angle of current refer to line to line voltage.

Both of equation (2) and (3) are the approximated error voltage. But in this paper, the deadtime effect is simply to be analyzed by actual error voltage by using MATLAB and simulation algorithms. The actual of error voltage is occurred at the deadtime interval and depends on the current direction. Equation (4) is used for the simulation of error voltage from deadtime effect.

$$\text{Error voltage} = V_{ideal} - V_{actual} \quad (4)$$

By prediction method, the current waveform can be predicted. The deadtime error voltage waveform is also determined. Finally, using FFT function in MATLAB Program, the spectra of error voltage can be determined.

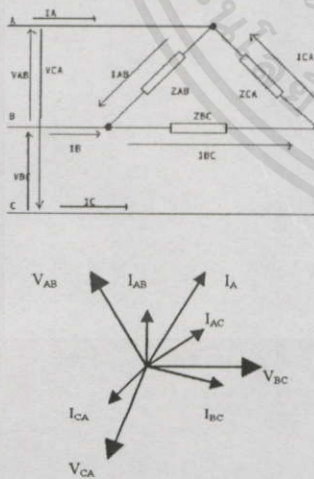


Figure 2 Voltage and Current Phasor Diagram

In unbalance load the phasor current are obtained as shown in equation (5) and the line current can be computed in equation (6).

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}}, \quad I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}}, \quad I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} \quad (5)$$

$$I_A = I_{AB} + I_{AC}, \quad I_B = I_{BC} + I_{BA} \quad (6)$$

$$I_C = I_{CA} + I_{CB}$$

In unbalanced load, the line current waveform is not the same as balanced but depend on load impedance and phase angle. In condition of unbalanced load, the analysis of deadtime effect using mathematics become complexity.

### 3. Simulation Algorithm

The algorithm of this simulation are shown in Fig 3. Users can put the value of overall necessary parameter for simulation or design such as Vdc link, type of switching patterns, switching frequency etc. Then the simulation will process the simulation results such as voltage and current waveform, voltage and current spectra, error voltage from deadtime effect. The necessary parameter for deadtime effect error voltage simulation are following: Vdc link, deadtime, switching frequency, modulation Index and impedance and phase impedance of load connected to output of inverter which can put in unbalanced condition. The value of these impedance and phase angles are able to put into program for current waveform prediction purpose.

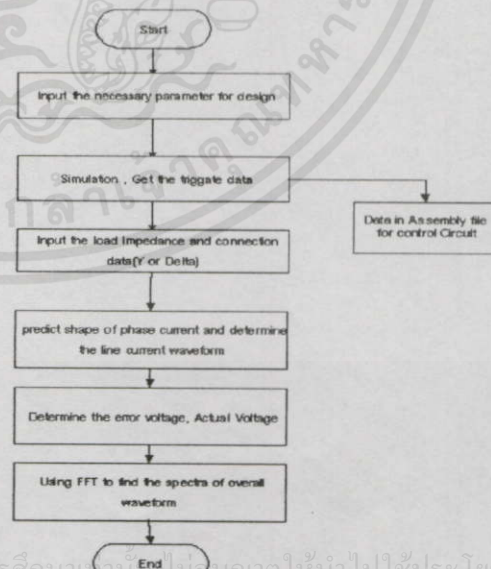


Figure 3 Simulation flow chart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทำการใดๆ ทั้งสิ้น อื่นทั้งนั้นเพื่อให้ดังมาลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4. Example of Results

Using this simulation program, the error voltage is first determined in the form of voltage waveform. The FFT function can provide the frequency domain purpose. In the line to line voltage, error voltage is defined as the different of phase error voltage. Figure 4 shows the error voltage evaluated by this program.

The switching patterns as SPWM, HIPWM and DPWM are generated to study the deadtime effect on unbalanced load purpose. All of waveform are implemented at the condition of modulation index 0.6, reference frequency = 50 Hz, deadtime = 4.88  $\mu$ s, load impedance delta connection and vary condition of load impedance in following:

1. delta connection balanced load  
 $Z_a = Z_b = Z_c = 74 \angle 50.24^\circ$   
 $R = 47.3 \ \Omega, L = 90.6 \text{ mH}$
2. magnitude unbalanced load  
 $Z_a = Z_b = 74 \angle 50.24^\circ$   
 $Z_c = 127 \angle 50.24^\circ, R = 81.26 \ \Omega, L = 311 \text{ mH}$
3. phase unbalanced load  
 $Z_a = Z_b = 74 \angle 50.24^\circ$   
 $Z_c = 118 \angle 79.04^\circ, R = 22.3 \ \Omega, L = 370 \text{ mH}$

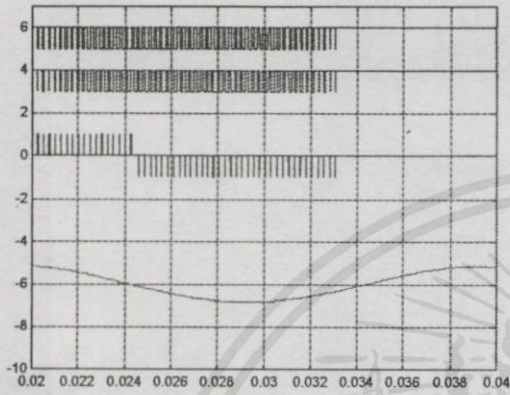


Figure 4 Example of error voltage for DPWM (a) Videal (b) Vactual (c) error voltage (d) current

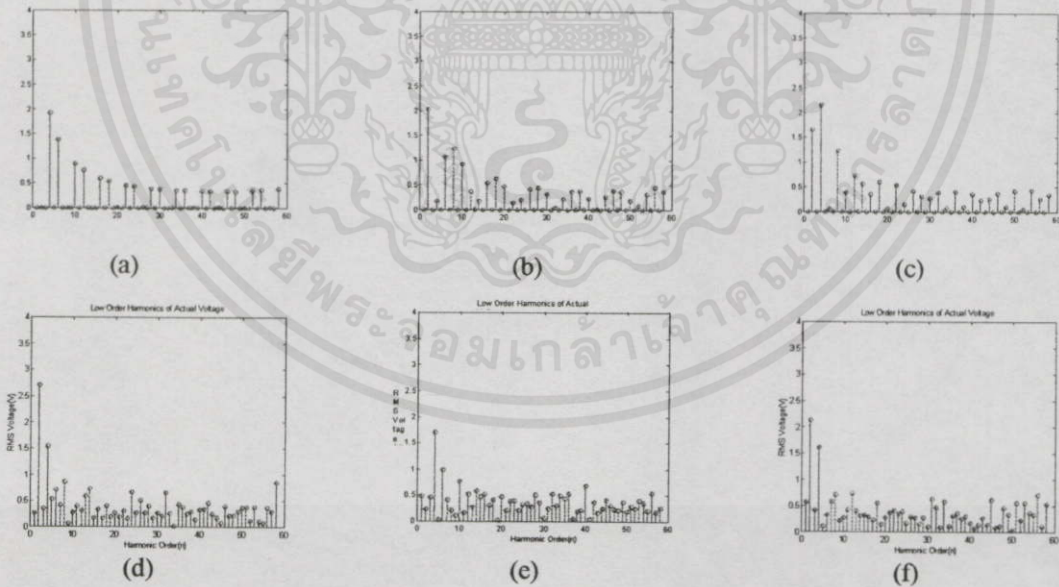


Figure 5 Simulated and measured actual voltage spectra 2<sup>nd</sup> to 60<sup>th</sup>: deadtime effect for SPWM (switching frequency = 4.05 kHz, modulation Index = 0.6, reference frequency = 50 Hz, deadtime = 4.88  $\mu$ s, (a), (b), (c) are the simulated results at the load condition of balanced, magnitude unbalance and phase unbalanced, respectively. Figures (d), (e), (f) are the measured at the load condition of balanced, magnitude unbalance and phase unbalanced load respectively.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่สามารถแจกจ่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

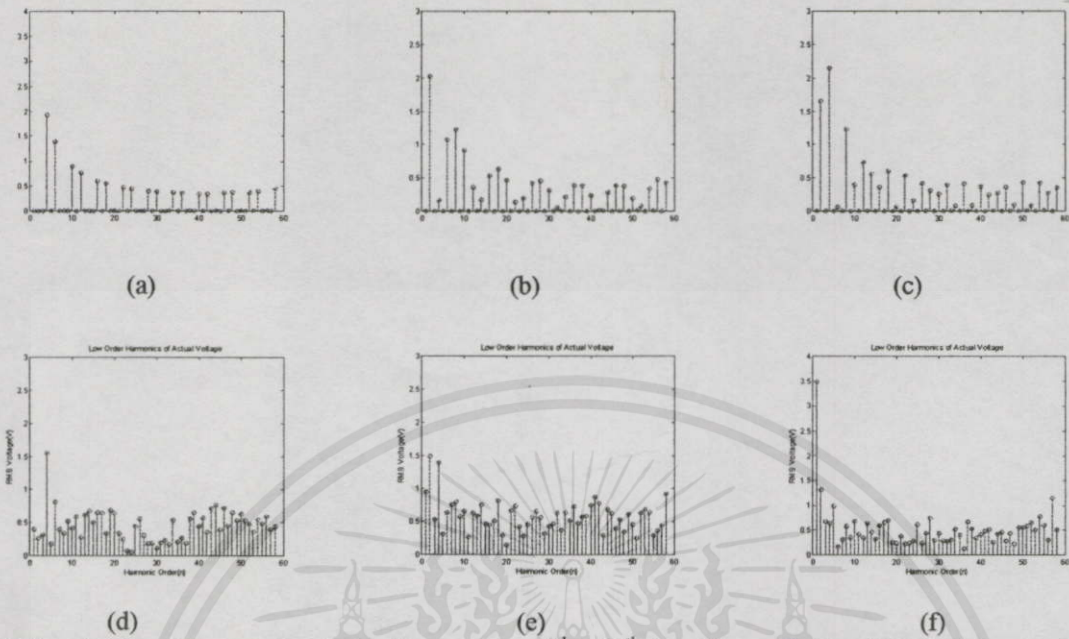


Figure 6 Simulated and measured actual voltage spectra 2<sup>nd</sup> to 60<sup>th</sup>: Deadtime effect for HIPWM the condition is same as Fig. 5. (a), (b), (c) are the simulated results at the load condition of balanced, magnitude unbalance and phase unbalanced load respectively. Figures (d), (e), (f) are the measured at the load condition of balanced, magnitude unbalance and phase unbalanced load respectively.

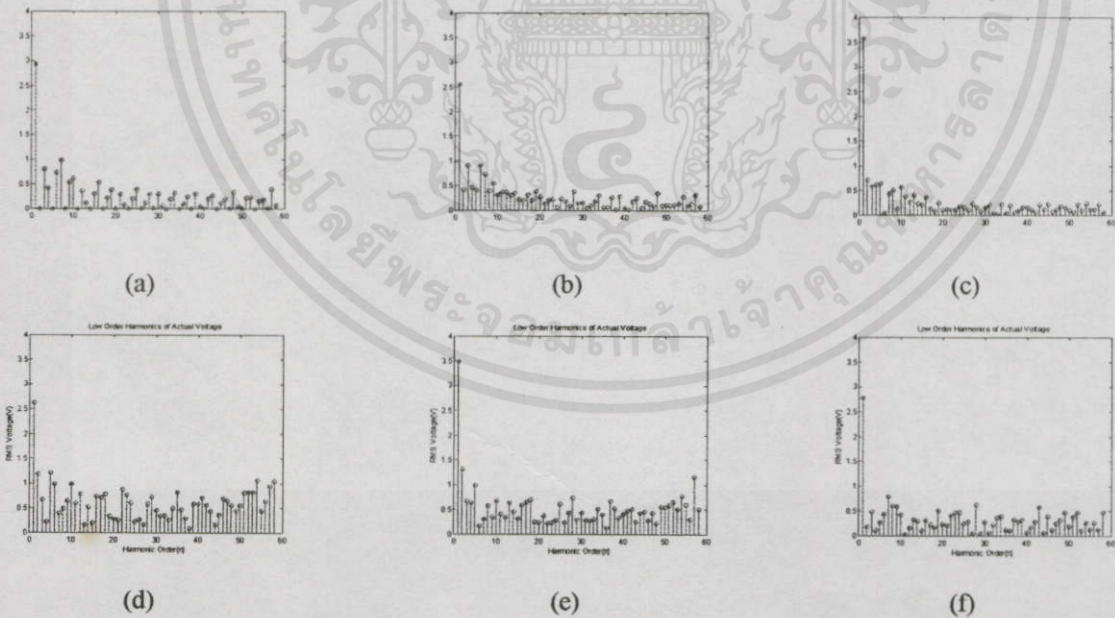


Figure 7 Simulated and measured actual voltage spectra 2<sup>nd</sup> to 60<sup>th</sup>: for DPWM with the same operating condition as Fig. 6

การที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 1 : Quality Index and distortion factor from simulated and measured results.**

Patterns	Condition	%THD <sub>v</sub>		%DF <sub>1</sub>		%DF <sub>2</sub>		V <sub>1rms</sub>		V <sub>rms</sub>	
		Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured
SPWM	Balanced	2.53	2.68	0.08	0.12	0.36	0.38	126.0	127.3	174.8	176.8
	Magnitude	2.65	3.31	0.11	0.24	0.41	0.77	126.3	128.7	175.3	177.2
	Phase	2.73	3.00	0.19	0.21	0.61	0.65	127.1	130.6	176.1	179.1
HIPWM	Balanced	2.70	3.05	0.08	0.09	0.38	0.34	124.9	127.8	173.4	176.8
	Magnitude	2.58	3.70	0.09	0.23	0.40	0.61	125.1	129.1	173.7	177.3
	Phase	2.83	3.29	0.18	0.17	0.58	0.48	125.9	130.1	174.6	178.5
DPWM	Balanced	2.95	2.87	0.55	0.53	1.12	1.07	128.7	131.1	179.7	183.2
	Magnitude	2.92	4.14	0.53	0.51	1.10	1.07	128.9	132.3	180.0	183.9
	Phase	2.93	3.95	0.51	0.65	1.07	1.35	129.13	134.1	180.2	185.4

Notes:  $\%DF_1 = 100 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / h^2} / V_1$ ,  $\%DF_2 = 100 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / h} / V_1$

## 5. Unbalanced Load Analysis

The unbalanced delta connected load has been implemented in two criteria. The first criteria is unbalanced magnitude of the load by setting impedance of phase C to be higher than phase A and B by 71.62% while the phase angle of the load is maintain at 50.24 degree. The second criteria is unbalanced phase angle of the load by setting the phase angle of phase C to be lower than those of phase A and B by 57.32%. In this criteria, the magnitude of the load is modified to meet the phase angle requirement.

Two unbalanced criteria have been compared with that of balanced load for SPWM, HIPWM and DPWM. The results are focused on waveform qualities such as THD<sub>v</sub>, DF<sub>1</sub>, DF<sub>2</sub> and V<sub>rms</sub> which are shown in Fig. 5,6,7 and concluded in Table 1. Figure 6 and 7 show that the phase angle of the load is sensitive than that of the magnitude in term of the low order harmonics with are focused up to 60<sup>th</sup> order.

Table 1 shows that the phase angle unbalanced results the variation of THD and DF with some supports from simulated and measured results. For example, in DPWM, DF<sub>1</sub> is more sensitive than that of the magnitude variation. This performance can be described as that error voltage affected by the deadtime is concluded with the load direction than that of the magnitude.

## 6. Conclusion

The analysis of deadtime effect on unbalanced load of magnitude and phase angle has been done for various PWM schemes such as SPWM, HIPWM and DPWM. The error voltage affected from deadtime is sensitive to phase angle of the load that that the variation of magnitude unbalanced load. The implementation has been done by simulated and measured results. This work can be indicted how the load angle affects the unbalanced load operation in terms of waveform qualities such as THD<sub>v</sub>, DF<sub>1</sub> and DF<sub>2</sub>. The further work is going to focused on unbalanced Y-connected load.

## References

- [1] F. Blaabjerg, U. Jaeger, S. Munk-Nielsen, and J. K. Pedersen. *Power losses in PWM-VSI inverter Using NPT or PT IGBT Devices*. *IEEE Trans. on Power Electronics*. Vol. 10, No. 3, pp. 358-367, 1995.
- [2] M. Boost and P. D. Ziogas. *State of the Art PWM Techniques: A Critical Evaluation*. *IEEE Trans. on Ind. Applications*. No. 2, pp. 271-280, 1988.
- [3] Ahmet M. Hava, Russel J. Kerkman and Thomas A. Lipo *A High-Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm*. *IEEE Trans. on Industry Applications*. Vol. 34, No. 5, pp.1059-1071, 1998.
- [4] V. A. Agelidis, P. D. Ziogas, and G Joos. "Dead-Band" PWM Switching Patterns, *IEEE Trans. on Power Electronics*. Vol. 11, No. 4, pp. 522-531, 1996.
- [5] A. Boglietti, G. Griva, M. Pastorelli, F. Profumo, and T. Adam. *Different PWM Modulation Technique Indexes Performance Evaluation*. *ISIE'93 Budapest*, pp. 193-199, 1993.
- [6] Mohan, Undeland and Robbin. *Power electronics, Converter Applications, and Design*. 2 nd editor, John-Wiley, pp 231-232
- [7] Seung-Gi Jeong an Min-Ho Park, *The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters*, *IEEE Trans. on Industrail Application*. Vol. 38, No. 2, pp. 108-114, 1991.
- [8] W. Khan-ngern, , *The Analysis and Evaluation of Pulsewidth Modulation Techniques for Inverters*, Ph.D Thesis, Imperial College of Scince, Technology and Medicine, 1997.

การศึกษานี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายสมยศ เกียรติวนิชวิไล เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2518 ที่จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา  
2538

ตั้งแต่ ปี 2538 ได้ทำงานตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า ในโรงงานนวลโลหะ บางปะกง บริษัทในเครือ  
ซีเมนต์ไทยจำกัด ปี 2540 ถึงปัจจุบัน ทำงานในตำแหน่ง วิศวกร ในศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์  
และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้