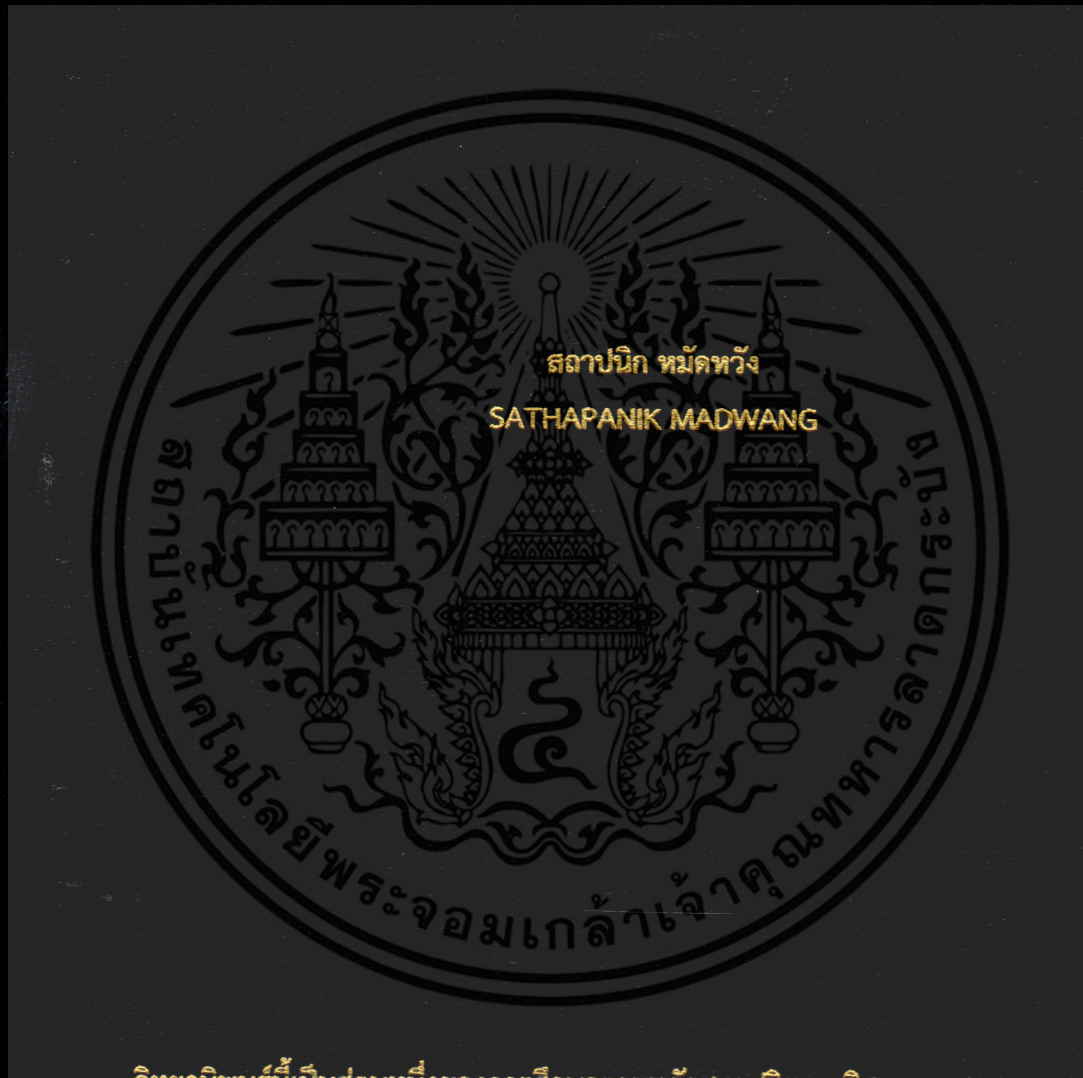


การควบคุมพีไอดีแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างสำหรับอินเวอร์เตอร์

FIXED-STRUCTURE ROBUST PID CONTROL FOR INVERTERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-020-043

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมพีไอดีแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างสำหรับอินเวอร์เตอร์

FIXED-STRUCTURE ROBUST PID CONTROL FOR INVERTERS



T148681



เลขหมู่
เลขทะเบียน 148681
ณ.เดือน.ปี 14 110. 2560

b. 12875542
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-EN-M-020-043

FIXED-STRUCTURE ROBUST PID CONTROL FOR INVERTERS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-020-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมพีไอดีแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างสำหรับอินเวอร์เตอร์
Thesis Title Fixed-Structure Robust PID-Control for Inverters
นักศึกษา นายสถาปนิก หมดหวัง
รหัสประจำตัว 58601260
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-043

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| รศ.ดร.วุฒิพล | ธราธิร์เศรษฐ์ |  |
| ศ.ดร.อิสระชัย | งามหุ |  |
| รศ.ดร.สมยศ | เกียรติวนิชวิไล |  |
| ผศ.ดร.ชัยยันต์ | เจตนาเสน |  |
| ผศ.ดร.วรชาติ | สุวรรณงาม |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมพีไอดีแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างสำหรับอินเวอร์เตอร์ |
| นักศึกษา | นายสถาปนิก หมดหวัง |
| รหัสนักศึกษา | 58601260 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2560 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) | รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยใช้การควบคุมแบบคงทน (Robust Control) อาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ได้มีลำดับสูงซึ่งสามารถนำมาใช้งานจริงได้ยากจึงต้องทำการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี การหาสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) แล้วทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน และนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอในด้านผลตอบสนองเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------|--------------------------------------------------|
| Thesis Title | Fixed-Structure Robust PID Control for Inverters |
| Student | Mr. Sathapanik Madwang |
| Student ID. | 58601260 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2017 |
| Thesis Advisor | Asst.Prof.Dr.Worachat Suwan-ngam |
| Thesis Co-Advisor | Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai |

ABSTRACT

This thesis aims to present the inverter control system by controlling the output voltage of the inverter while varying load. In this research, the H Infinity mixed-sensitivity technique was used to design the robust control. As results indicated, the synthesized controller is still in high order, which is difficult to be practically implemented. In addition, in several applications, the structure of controller is needed to be rearranged into the PID structure. Thus, in the proposed technique, the Particle Swarm Optimization (PSO) is used to find the PID parameter. As shown in the results, the evolved PID controller has the nearly same performance as robust controller when compared with the conventional PI controller tuned by the Ziegler-Nichols method. The fixed-structure PID controller gives the better result than the conventional PI controller in term of time response.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นอย่างดีได้ด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม และรศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความกรุณา และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF045409

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการ ECC305 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ คอยให้การช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จคล่องด้วยดี คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาปนิก หมดหวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา III และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|---|
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการศึกษา..... | 3 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย..... | 5 |
| 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ และหลักการทำงาน..... | 5 |
| 2.1.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์..... | 6 |
| 2.1.1.1 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม..... | 8 |
| 2.1.2 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส..... | 11 |
| 2.1.2.1 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์..... | 12 |
| 2.1.2.2 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์..... | 14 |
| 2.1.3 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้านำออกของอินเวอร์เตอร์..... | 16 |
| 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์..... | 19 |
| 2.3 การควบคุมแบบคงทน..... | 21 |
| 2.3.1 เสถียรภาพ และสมรรถนะของระบบป้อนกลับ..... | 21 |
| 2.3.2 ผลตอบสนองวงปิด..... | 22 |
| 2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขบังคับบนผลตอบสนองความถี่..... | 23 |
| 2.3.4 การจัดรูปทั่วไปสำหรับปัญหาการควบคุม..... | 26 |
| 2.3.5 การควบคุมที่เหมาะสมที่สุด H_{∞} | 28 |

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.3.5.1 การควบคุม H_{∞} แบบความไวผสม ไม่อนุญาตให้แก้ไขปรับปรุง 30

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี | 33 |
| 2.4.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) | 34 |
| 2.4.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) | 35 |
| 2.4.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) | 36 |
| 2.4.4 การควบคุมแบบสัดส่วน – ปริพันธ์ – อนุพันธ์ (ตัวควบคุมพีไอดี) | 38 |
| 2.4.5 การทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี | 39 |
| 2.5 พาติเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) | 41 |
| บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้ และวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ | 43 |
| 3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน | 43 |
| 3.1.1 การเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสำหรับสมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง และสมรรถนะในการชจัดการรบกวน | 44 |
| 3.1.2 การเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสำหรับความคงทน | 45 |
| 3.1.3 การสังเคราะห์ตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) | 46 |
| 3.2 การกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี | 47 |
| 3.3 โครงสร้างของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุม | 49 |
| 3.3.1 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) | 49 |
| 3.3.2 วงจรอปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Couplers) | 51 |
| 3.3.3 วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) | 52 |
| 3.3.4 วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter) | 53 |
| 3.3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) | 54 |
| 3.3.6 วงจรป้อนกลับแรงดัน | 56 |
| 3.3.6.1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) | 56 |
| 3.3.6.2 วงจรยกระดับแรงดัน (Offset Voltage Adjustment Circuit) | 56 |
| 3.3.7 โหลดที่ใช้กับวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ | 57 |
| 3.4 สรุปผลการออกแบบ | 58 |
| บทที่ 4 ผลการจำลอง และผลการทดลอง | 60 |
| 4.1 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ | 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา V และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.1 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน | 62 |
| 4.1.2 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 64 |
| 4.2 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)..... | 66 |
| 4.3 ผลการทดลองจากวงจรอินเวอร์เตอร์ | 68 |
| 4.4 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์..... | 70 |
| 4.4.1 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน | 71 |
| 4.4.2 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 76 |
| 4.4.3 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด..... | 82 |
| 4.4.3.1 การเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน | 82 |
| 4.4.3.2 การเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 85 |
| 4.5 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลอง | 88 |
| 4.5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน..... | 89 |
| 4.5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 91 |
| 4.6 สรุปผลการจำลอง และผลการทดลอง..... | 94 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... | 96 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 96 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 97 |
| เอกสารอ้างอิง | 98 |
| ภาคผนวก..... | 100 |

เอกสารภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... ไม่อนุญาตให้แก้ไขได้. 101

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|----------------------|----------|
| ประวัติผู้เขียน..... | หน้า 110 |
|----------------------|----------|



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 เงื่อนไขการสวิตช์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์..... | 15 |
| 2.2 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์..... | 16 |
| 2.3 ผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มค่าเกน K_p , K_i , และ K_d | 38 |
| 2.4 ค่าเกนที่เหมาะสมตามวิธีการของซิกเลอร์นิโคล..... | 41 |
| 4.1 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็น ตัวต้านทาน..... | 75 |
| 4.2 ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็น ตัวต้านทาน..... | 76 |
| 4.3 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 81 |
| 4.4 ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็น ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 82 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VIII ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ | 5 |
| 2.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส | 6 |
| 2.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส | 7 |
| 2.4 โหมดการทำงานใน 4 จตุภาคของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส | 7 |
| 2.5 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่หนึ่งกึ่ง | 8 |
| 2.6 พีดีบีเบิลยูเอ็มแบปไซน์ (sinusoidal pulsewidth modulation: SPWM) | 9 |
| 2.7 การสร้างสัญญาณสวิตซ์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็มแบปในช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น | 10 |
| 2.8 รูปคลื่นแบบพีดีบีเบิลยูเอ็มแบปโอเวอร์มอดูเลชัน | 11 |
| 2.9 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฮาล์ฟบริดจ์ และแบบฟูลบริดจ์ | 12 |
| 2.10 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ | 14 |
| 2.11 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ | 15 |
| 2.12 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ | 18 |
| 2.13 วงจรอินเวอร์เตอร์ | 19 |
| 2.14 วงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน | 19 |
| 2.15 แผนภาพโมเดลของระบบวงเปิดของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส | 20 |
| 2.16 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) | 23 |
| 2.17 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) | 24 |
| 2.18 เงื่อนไขบังคับบน $ S(j\omega) $ และ $ T(j\omega) $ | 26 |
| 2.19 เงื่อนไขบังคับบนแผนภาพโพลของ $L(s)$ | 26 |
| 2.20 กรอบการออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่ | 28 |
| 2.21 ปัญหาความไวผสม S/KS สำหรับการคุมค่า | 32 |
| 2.22 ปัญหาความไวผสม S/KS สำหรับการตามรอยคำสั่ง | 32 |
| 2.23 ปัญหาความไวผสม S/T | 33 |
| 2.24 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี | 34 |
| 2.25 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย | 34 |
| 2.26 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน | 35 |
| 2.27 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย | 36 |
| 2.28 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ | 36 |
| 2.29 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย | 37 |
| 2.30 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ | 37 |

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา IX และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.31 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีไอดีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย | 39 |
| 2.32 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี | 39 |
| 2.33 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของซิกเลอร์นิโคล | 40 |
| 2.34 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้ | 40 |
| 2.35 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในวิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน | 41 |
| 2.36 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน | 42 |
| 3.1 แผนภาพการควบคุมแบบคงทน | 43 |
| 3.2 ค่าเอกฐานของฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 | 45 |
| 3.3 ค่าเอกฐานของ $\Delta(s)$ และฟังก์ชันน้ำหนัก W_2 | 46 |
| 3.4 ค่าเอกฐานของ $S(s)$ และ $T(s)$ | 47 |
| 3.5 ค่าเอกฐานของ $S(s)$ และ $1/W_1(s)$ | 47 |
| 3.6 กราฟแสดงการหาค่า $\ T_{wz}\ _{\infty}$ ในแต่ละรอบ | 48 |
| 3.7 โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ | 49 |
| 3.8 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 50 |
| 3.9 วงจรออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 51 |
| 3.10 วงจรเรียงกระแส (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 52 |
| 3.11 วงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 54 |
| 3.12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 55 |
| 3.13 วงจรป้อนกลับแรงดัน (ก) แผนผังวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดลอง | 57 |
| 3.14 โหลดตัวต้านทาน | 58 |
| 3.15 โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 58 |
| 4.1 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล | 62 |
| 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง | 63 |
| 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน | 63 |
| 4.4 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่วงอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล | 64 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา X และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.5 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง..... | 65 |
| 4.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน..... | 65 |
| 4.7 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่ใช้ในการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์..... | 68 |
| 4.8 แผนภาพของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ หนึ่งเฟส..... | 68 |
| 4.9 การสวิตช์ซึ่งแบบยูนิโพลาร์แบบปรับเฟส (Shift Phase) ของวงจรอินเวอร์เตอร์..... | 69 |
| 4.10 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัว ต้านทาน..... | 69 |
| 4.11 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัว ต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ..... | 70 |
| 4.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป..... | 71 |
| 4.13 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล... 72 | 72 |
| 4.14 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง..... | 73 |
| 4.15 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน..... | 74 |
| 4.16 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่า ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล..... | 77 |
| 4.17 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนด โครงสร้าง..... | 79 |
| 4.18 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน..... | 80 |
| 4.19 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์ นิกอลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน..... | 83 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.20 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน | 84 |
| 4.21 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน | 85 |
| 4.22 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 86 |
| 4.23 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 87 |
| 4.24 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 88 |
| 4.25 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน | 89 |
| 4.26 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน | 90 |
| 4.27 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน | 91 |
| 4.28 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 92 |
| 4.29 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 93 |
| 4.30 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ | 94 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา XII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้การควบคุมอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานระบบยานอวกาศ ระบบหุ่นยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตที่ทันสมัยในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมเชิงตัวเลขของเครื่องจักรและเครื่องมือต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม ในการออกแบบระบบการบินอัตโนมัติในอุตสาหกรรมการบิน การออกแบบรถยนต์และรถบรรทุกในอุตสาหกรรมยานยนต์ การปฏิบัติการต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมความดัน อุณหภูมิ ความชื้น ความหนืด และการไหลในกระบวนการทางอุตสาหกรรม แต่ในวิจัยนี้ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยนำการควบคุมอัตโนมัติมาใช้กับระบบไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ที่นำไปใช้งานเป็นวงจรที่เป็นการแปรผันจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทนได้ ตัวอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่ผลิตออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อบเขตในการใช้งานที่แคบ จึงต้องทำการเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งทำให้มีข้อบเขตและความเหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้นโดยใช้อินเวอร์เตอร์แปลงพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม ด้านเกษตรกรรม ด้านบริการและอื่นๆ ดังนั้นการควบคุมอินเวอร์เตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง [1-3] โดยทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีเทคนิคจำนวนมากที่ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม อาทิเช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี [4] การควบคุมแบบการวิเคราะห์วงรอบปิด [5] ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้นไม่ได้กล่าวถึงการรับประกันเสถียรภาพระบบควบคุมที่ถูกสนใจนำมาใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ คือ ระบบควบคุมแบบคงทนซึ่งมีผู้วิจัยไว้จำนวนมาก [6,7] โดยทั่วไปในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนต้องเริ่มทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ใน [8] ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับภายใต้ชนิดของโหลดที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) [9,10] ใน [9,10] ได้ตัวควบคุมที่มีอันดับสูงยากต่อการนำไปใช้งานจริง ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวควบคุมมีอันดับต่ำก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ง่าย จึงได้ทำการกำหนดโครงสร้างให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการใช้วิธีการพาติเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมเพื่อให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงทน (ใน [11] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชันเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแต่ไม่ได้คำนึงถึงความคงทน)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดและเหมาะสมที่สุดเมื่อเกิดปัญหาการรบกวนการทำงานของระบบทั้งภายนอกและภายในขึ้นโดยใช้วิธีการออกแบบการควบคุมที่ใหม่และง่ายต่อการทำความเข้าใจในการสร้างตัวควบคุมระบบที่มีประสิทธิภาพสูง โดยนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน (Robust control) โดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ในการออกแบบตัวควบคุมและทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชันในการหาตัวแปรในโครงสร้างของตัวควบคุมที่กำหนด ทำให้ได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมและคงทน แล้วนำตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้จากการกำหนดโครงสร้างไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) [12]

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบคงทน และตัวควบคุมที่ทำการกำหนดโครงสร้าง

1.2.2 ศึกษาเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่เป็นการควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity)

1.2.3 ศึกษาวิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี

1.2.4 ศึกษาการรบกวนการทำงานของระบบทั้งภายนอกและภายในระบบ แล้วระบบยังคงทนและปฏิบัติงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2.5 เพื่อออกแบบการควบคุมระบบไฟฟ้าที่สามารถนำไปพัฒนา หรือนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและศึกษาการควบคุมระบบไฟฟ้าหรือระบบควบคุมอื่นๆต่อไปได้

1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ที่มีการกำหนดโครงสร้างให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ในการหาสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน เห็นได้ว่าตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมแบบคงทนมี่อันดับสูงยากต่อการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ในทางตรงกันข้ามตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีอันดับต่ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้ง่าย ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบถูกตรวจสอบจากผลตอบสนองของระบบด้วยโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ผลของการเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างพบว่าสมรรถนะใกล้เคียงกัน และนำตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอในด้านผลตอบสนองเชิงเวลา

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบคงทนโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) สำหรับวงจรถอนอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ คือ 50 โวลต์ (V_{rms}) ระบบที่ทดสอบมีตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) การทดสอบทำการทดสอบในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ คือ โหลดของวงจร เพื่อศึกษาความคงทนของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ทำการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method)

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาไว้โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ก. ศึกษา และหาแนวทางในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม กำหนดวัตถุประสงค์การควบคุม และแบบจำลองที่เลือก
- ข. การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน
- ค. ออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน และกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method)
- ง. ตรวจสอบผล และสรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน และขอบเขตการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวงจรอินเวอร์เตอร์ และการควบคุม ได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส แนวคิดพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบคงทน การควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ตัวควบคุมแบบพีไอดี การทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี และพาทีเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization)

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจร อธิบายถึงวิธีการ ขั้นตอน และผลการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน และการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการพาทีเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization)

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบเพื่อควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อศึกษาผลที่ได้ของระบบในกรณีต่างๆ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

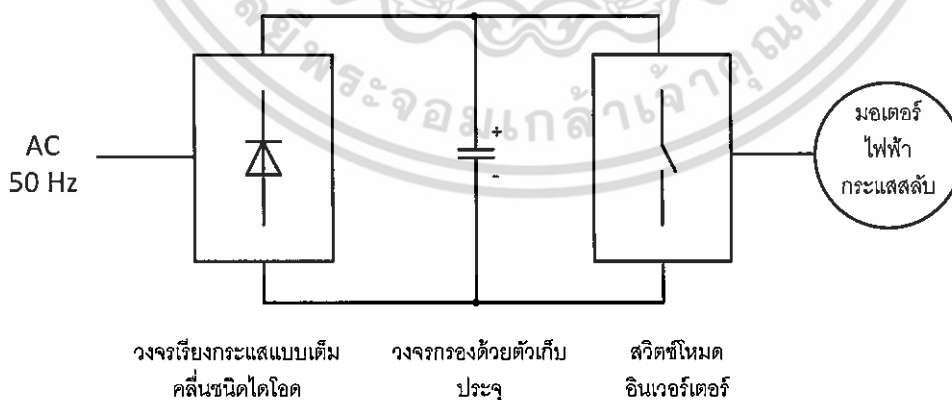
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

บทนี้แสดงรายละเอียดของทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ แนวคิดพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบคงทน การควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ตัวควบคุมแบบพีไอดี การทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) และวิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุม โดยทฤษฎีทั้งหมดนี้เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ และหลักการทำงาน [16]

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปรผันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) ทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับตามขนาดและความถี่ที่ต้องการ แรงดันเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ โดยส่วนใหญ่นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม เมื่อแบ่งอินเวอร์เตอร์เป็นสองชนิด คือ ชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลัง (power supplies) ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ (static) เช่น ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง (Uninterruptible Power Supplies : UPS) ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรหลักในการทำงาน เป็นต้น กับอีกประเภทหนึ่ง คือ ชนิดที่โหลดมีการหมุนหรือเคลื่อนที่ (dynamic) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.1 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 2.1 แสดงสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยรับไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดไดโอดและกรองด้วยตัวเก็บประจุ เพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

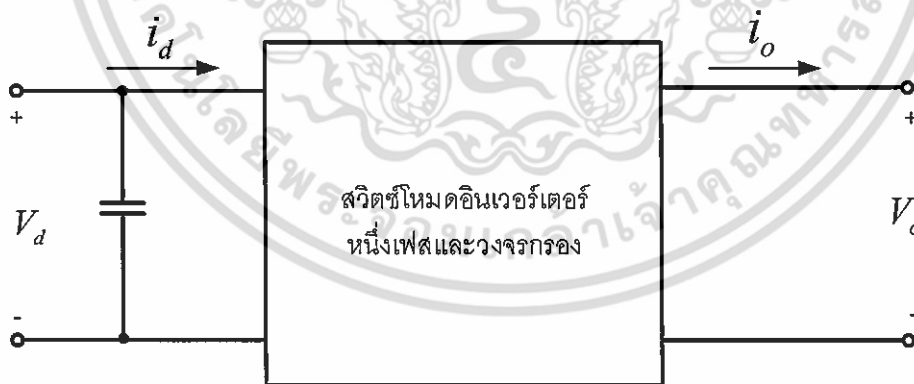
เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบ และส่งต่อไปยังสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายให้กับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ในหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่แปรผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) กับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI)

อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบ่งเป็นสองประเภทที่นิยมนำไปใช้งาน คือ อินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width-Modulation inverter : PWM inverter)

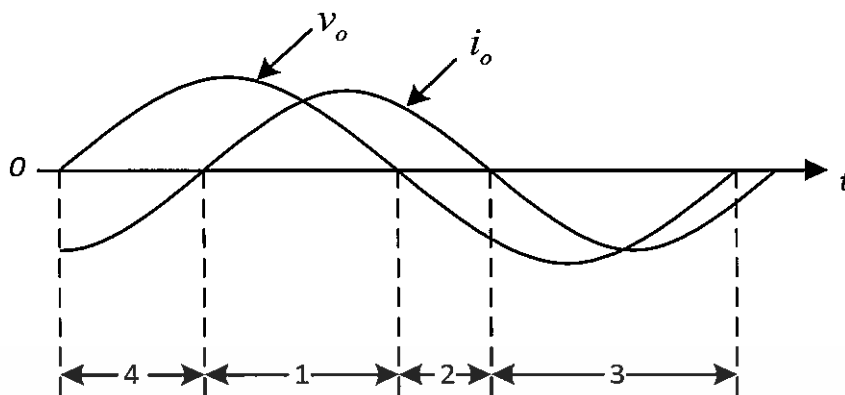
2.1.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปรผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 2.2 ไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุต (v_d) และกระแสไฟฟ้าอินพุต (i_d) ส่งผ่านเข้าไปยังสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสและวงจรกรอง ทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์เนื่องจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนในรูปที่ 2.3 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งสัญญาณที่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ กระแสไฟฟาล้ำหลังแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

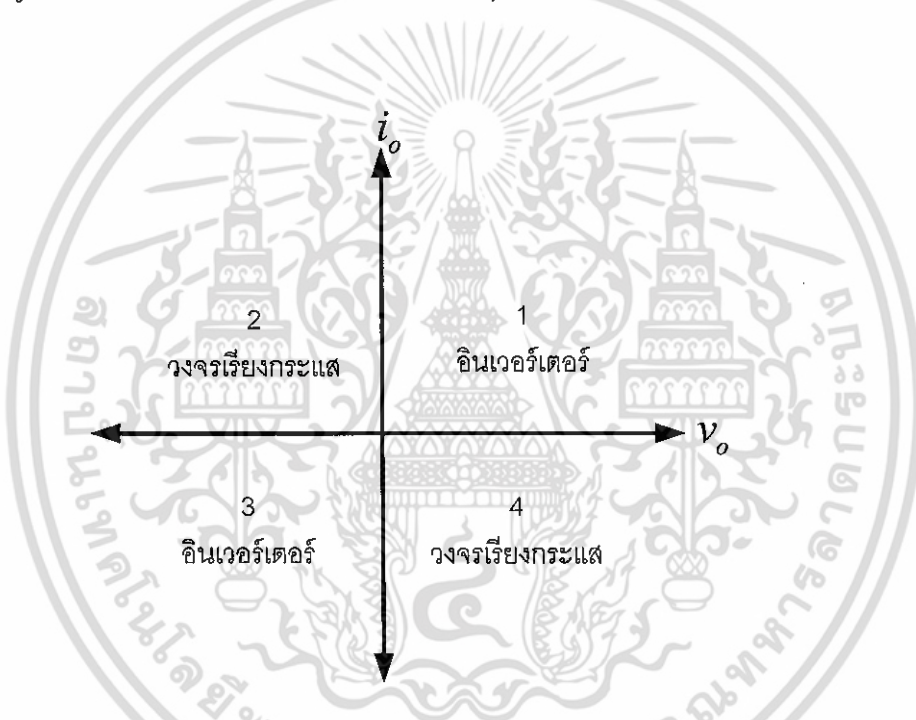


รูปที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส



รูปที่ 2.4 โหมดการทำงานใน 4 จุดภาคของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

จากรูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบโหมดการทำงานใน 4 จุดภาคของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหมดการทำงานดังนี้

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นบวก i_o เป็นบวก p_o เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 2 โหมดรีแรงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v_o เป็นลบ i_o เป็นบวก p_o เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d)

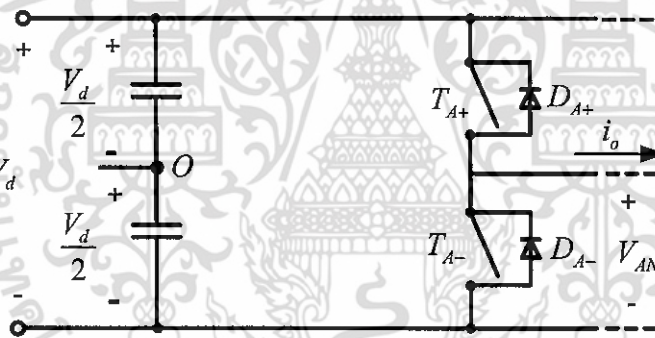
โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นลบ i_o เป็นลบ p_o เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นบวก i_o เป็นลบ p_o เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (v_d)

เพื่อความเข้าใจในหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.5 แสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม

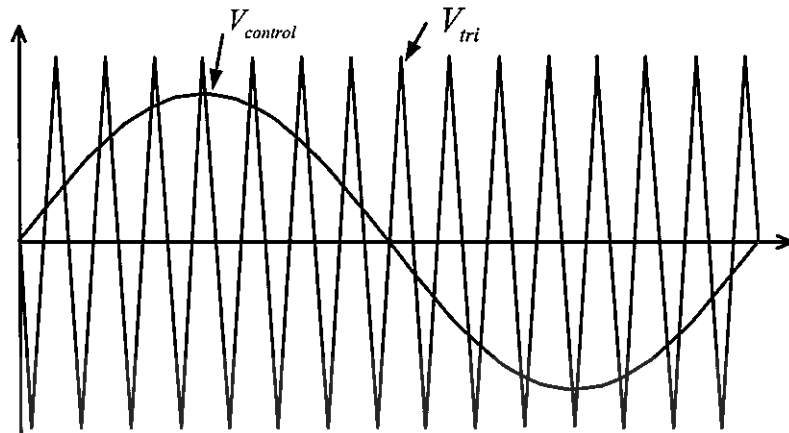


รูปที่ 2.5 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่หนึ่งกิ่ง

2.1.1.1 การสวิตช์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ ทำการสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มโดยใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ซึ่งเรียกว่าการสวิตช์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบไซน์แสดงในรูปที่ 2.6 ความถี่ของการสวิตช์ (f_s) เท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulsewidth modulation : SPWM)

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

- $V_{control}$ สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้า และความถี่เอาต์พุต
- V_{tri} สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง
- f_1 ความถี่หลักมูลทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
- f_s ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
- m_a อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
- m_f อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f นิยามจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.1)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมไซน์

\hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับวงจรในรูปที่ 2.5 มีเงื่อนไข คือ

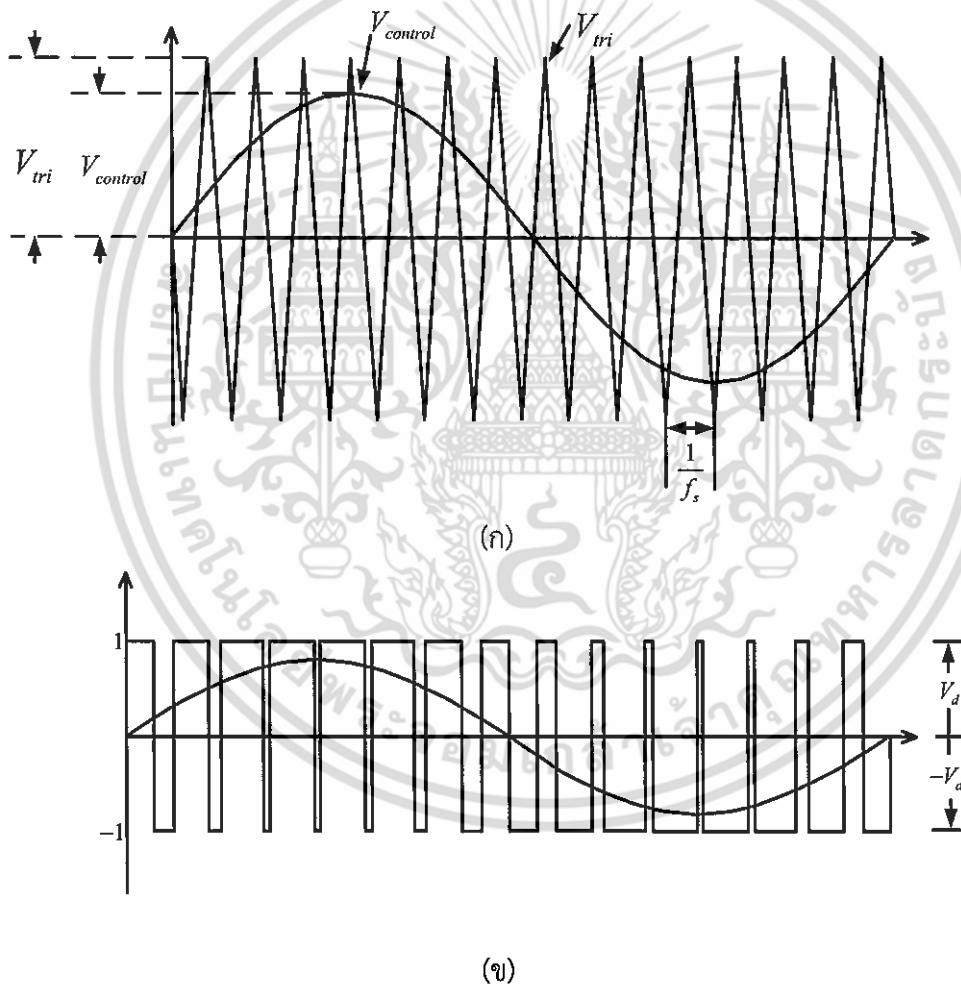
$$V_{control} > V_{tri} \quad T_{A+} \text{ นำกระแส} \quad V_{A0} = \frac{1}{2}V_d \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{control} > V_{tri} \quad T_{A-} \text{ นำกระแส} \quad V_{Ao} = -1/2 V_d \quad (2.4)$$

การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} ขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $V_{control}$ กับ V_{tri} โดยมีเงื่อนไขดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) และไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส

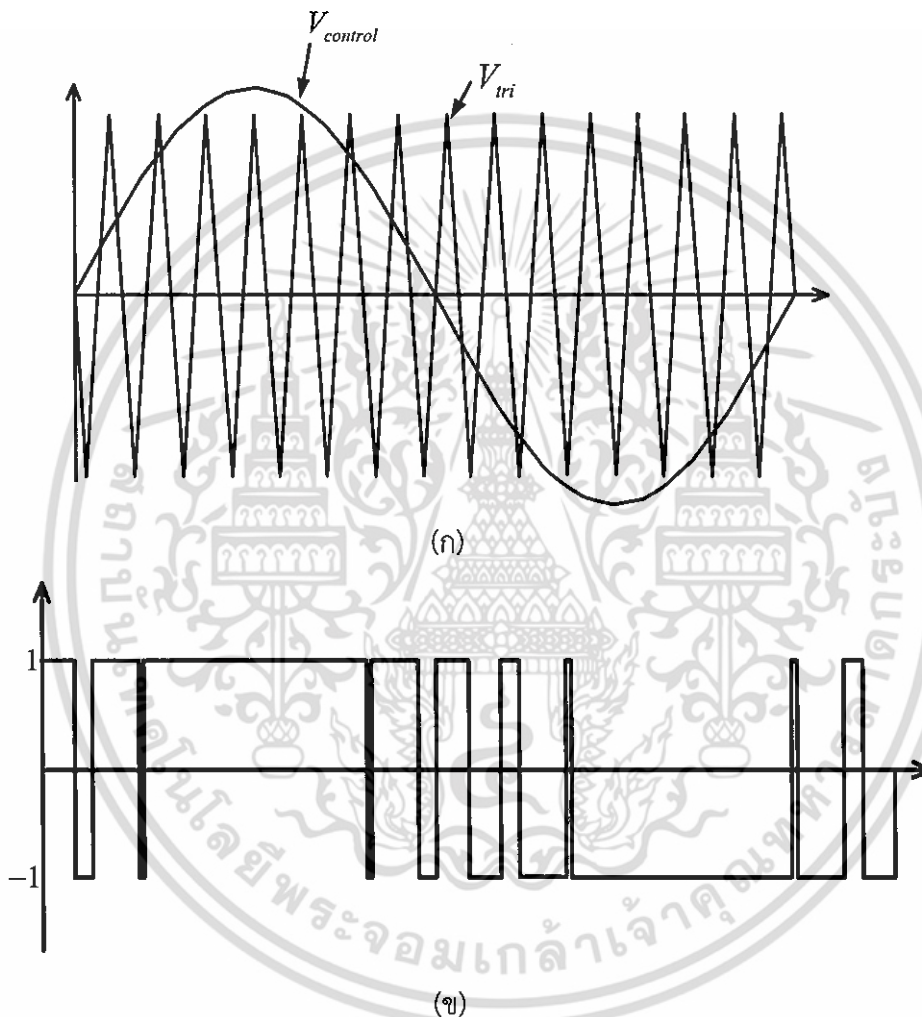
ในการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มสามารถเกิดได้สองกรณี คือ กรณีที่ $1 \leq m_a \leq 1$ เป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (fundamental-frequency component of the output voltage) แปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มในช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น

กรณีที่ 2 $m_a > 1$ เป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต เกิดขึ้นเมื่อ $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$ โดยค่ารูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตช์แสดงดังในรูปที่ 2.8 ข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลมีค่าสูงกว่ากรณี $m_a \leq 1$ แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าไม่เอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชันคือทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้เกิดความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ อาจมีผลเสียต่อสมรรถนะของมอเตอร์ได้



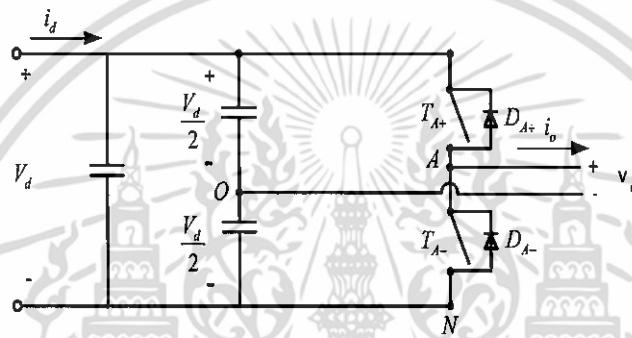
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแบบพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน

2.1.2 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

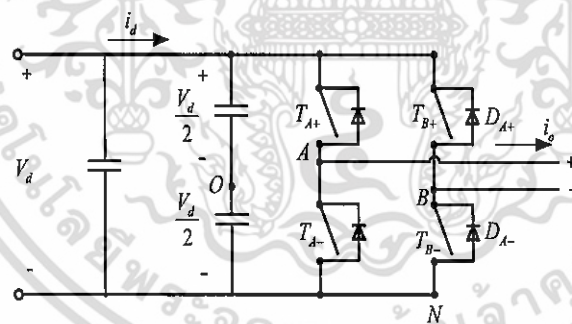
อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full-bridge) ในแบบฮาล์ฟบริดจ์มีตัวเก็บประจุสองตัวต่อกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ $V_d / 2$ จุดกึ่งกลางแรงดันไฟฟ้า (จุด o) ในรูปที่ 2.9 (ก) มีค่าคงที่เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสประกอบไปด้วยสองกิ่ง คือ กิ่ง A และ กิ่ง B ในรูปที่ 2.9 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์สองเท่า จึงเหมาะสมที่เลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น

เงื่อนไขสำคัญของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ คือ การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการสวิตช์ซิงของ T_{A+} และ T_{A-} จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติต้องการช่วงเวลาที่ยาวขึ้นที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งเรียกว่าเดดไทม์ (dead time) โดยเดดไทม์อยู่ในช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแสหรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฮาล์ฟบริดจ์ และแบบฟูลบริดจ์

2.1.2.1 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์ (bipolar voltage switching) คือ การควบคุมให้สวิตช์แบบฟูลบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เช่น ในรูปที่ 2.9 (ข) การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{B-} ถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์ T_{A-} และ T_{B+} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของกิ่ง A มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{Ao} = \frac{1}{2} V_d \quad \text{เมื่อ } V_{\text{control}} > V_{\text{tri}} \quad \text{สวิตช์ } T_{A+} \text{ และ } T_{B-} \text{ นำกระแส} \quad (2.5)$$

$$V_{Ao} = -\frac{1}{2} V_d \quad \text{เมื่อ } V_{\text{control}} < V_{\text{tri}} \quad \text{สวิตช์ } T_{A-} \text{ และ } T_{B+} \text{ นำกระแส} \quad (2.6)$$

เมื่อคิดจากอีกหนึ่งกิ่งของอินเวอร์เตอร์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของกิ่ง B เท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของกิ่ง A คือ $V_{Bo} = -V_{Ao}$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างกิ่ง A และกิ่ง B คือ

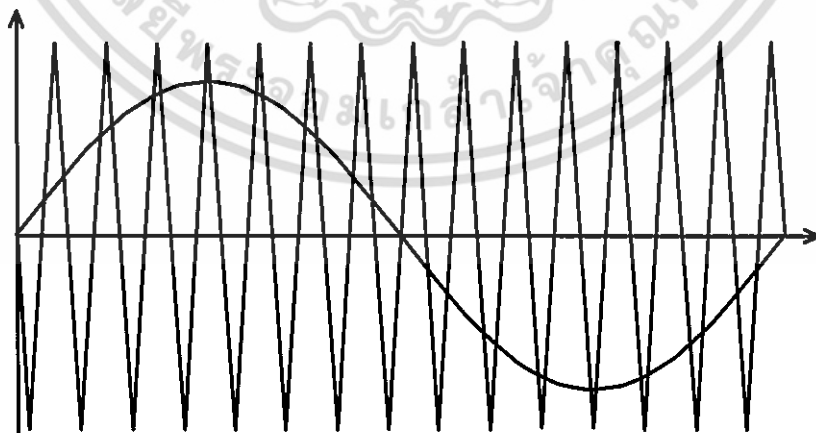
$$V_o = V_{Ao} - V_{Bo} = 2V_{Ao}$$

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.7)$$

$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad \text{เมื่อ } m_a > 1.0 \quad (2.8)$$

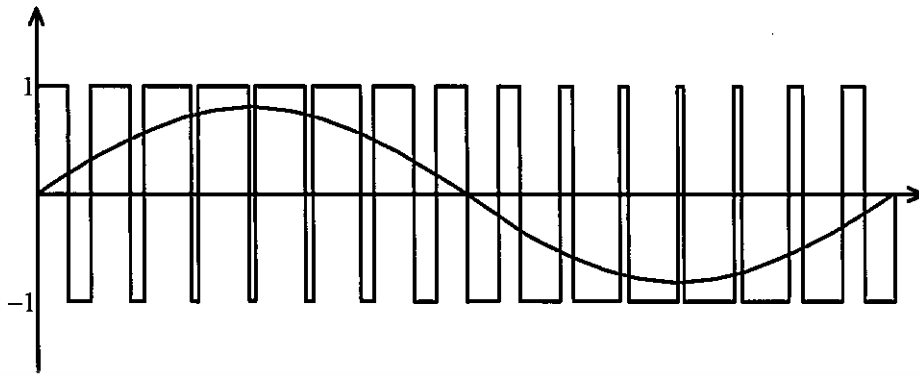
หรืออาจสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับสมการที่ (2.7) เมื่อ m_a อยู่ในย่านเชิงเส้น และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับสมการที่ (2.8) เมื่อ m_a อยู่ในช่วงโอเวอร์มอดูเลชัน

โดยที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสวิตช์อยู่ระหว่าง $+V_d$ กับ $-V_d$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนไซด์แบนฮาร์โมนิกเกิดขึ้นรอบๆ m_f , $2m_f$, $3m_f$, ... เช่น หากความถี่สวิตช์เท่ากับ 20 kHz ไซด์แบนฮาร์โมนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz, และ 60 kHz เป็นต้น



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.10 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการสวิตซ์แบบไบโพลาร์ คือ

1. มีการสวิตซ์ของแรงดันระหว่างสาย (V_o หรือ V_{ab}) ระหว่างขั้วหรือบัสบวกกับลบ
2. ความถี่ของพัลส์ที่ไหลตัดเท่ากับความถี่ของ V_{tri}
3. เกิดความถี่จากสเปกตรัม คือ เริ่มต้นที่รอบๆ f_s และจำนวนเท่าของ f_s

2.1.2.2 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับแบบยูนิโพลาร์ (unipolar voltage switching) ก็คือในแบบยูนิโพลาร์การสวิตซ์ในกึ่ง A กับกึ่ง B แยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือ สวิตซ์ในกึ่ง A ถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ขณะที่สวิตซ์ในกึ่ง B ถูกควบคุมจากสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) แสดงในรูปที่ 2.11 การสวิตซ์มีเงื่อนไขดังนี้

| | | |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|
| เมื่อ $V_{control} > V_{tri}$ | สวิตซ์ T_{A+} นำกระแส | $V_{AN} = V_d$ |
| เมื่อ $V_{control} < V_{tri}$ | สวิตซ์ T_{A-} นำกระแส | $V_{AN} = 0$ |
| เมื่อ $-(V_{control}) > V_{tri}$ | สวิตซ์ T_{B+} นำกระแส | $V_{BN} = V_d$ |
| เมื่อ $-(V_{control}) < V_{tri}$ | สวิตซ์ T_{B-} นำกระแส | $V_{BN} = 0$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตช์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

| เงื่อนไข | สวิตช์นำกระแส | สวิตช์นำกระแส | V_{AN} | V_{BN} | V_o |
|----------|---------------|---------------|----------|----------|--------|
| 1 | T_{A+} | T_{B-} | V_d | 0 | V_d |
| 2 | T_{A-} | T_{B+} | 0 | V_d | $-V_d$ |
| 3 | T_{A+} | T_{B+} | V_d | V_d | 0 |
| 4 | T_{A+} | T_{B-} | 0 | 0 | 0 |

จากตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (V_o หรือ V_{ab}) เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตช์ซึ่งสูง เช่น กรณีไบโพลาร์



รูปที่ 2.11 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคร่อมโพล (V_o) แสดงในตารางที่ 2.1

ผลที่ได้จากเงื่อนไขการทำงานในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.11 คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังบวกในครึ่งคาบ ส่วนอีกครึ่งคาบมีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์และจากศูนย์ไปยังลบ ซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงเรียกวิธีการสวิตช์นี้ว่ายูนิโพลาร์ ส่วนขนาดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับกับแบบไบโพลาร์และเมื่อเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสวิตช์ทั้งสองแบบแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์

| ประเด็น | ไบโพลาร์ | ยูนิโพลาร์ |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (\hat{V}_{o1}) $m_a \leq 1.0$ | $\hat{V}_{o1} = m_a V_d$ | $\hat{V}_{o1} = m_a V_d$ |
| แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (\hat{V}_{o1}) $m_a > 1.0$ | $V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$ | $V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$ |
| แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) | $V_d \Leftrightarrow (-V_d)$ | $V_d \Leftrightarrow 0$ $(-V_d) \Leftrightarrow 0$ |
| ไซด์แบนฮาร์โมนิก | $m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ | $2m_f, 4m_f, 6m_f, \dots$ |
| การกรองความถี่สูง | ดี | ดีมาก |
| การควบคุม | ง่าย | ซับซ้อน |

ข้อเปรียบเทียบของสองเทคนิค คือ แตกต่างกันที่แรงดันเอาต์พุตที่มีระดับการเปลี่ยนแปลงของยูนิโพลาร์จะมีแรงดันศูนย์ไปบวกหรือศูนย์ไปลบและมีไซด์แบนด์ที่ $2m_f, 4m_f, 6m_f, \dots$ ตามลำดับ ส่วนยูนิโพลาร์ที่มีความถี่สวิตซ์สูงกว่าทำให้การกรองความถี่ทำได้ง่ายขึ้น วงจรกรองมีขนาดเล็ก และประหยัด

2.1.3 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติกิ่งๆของอินเวอร์เตอร์ สวิตซ์ตัวบนและตัวล่างต้องไม่นำกระแสพร้อมกันดังนั้นจึงต้องการช่วงเวลาที่ยุติสวิตซ์ทั้งคู่หยุดนำกระแสก่อนที่สวิตซ์จะเปลี่ยนสถานะ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่าง บัสบวกกับบัสลบ ช่วงเวลานี้เรียกว่า เดดไทม์ (dead time หรือ blanking time) ซึ่งเวลาเดดไทม์ดังกล่าวต้องมีความเหมาะสมคือหากมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้มีโอกาสลัดวงจรได้ง่ายหรือถ้าหากมีค่ามากเกินไปก็อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไป

สวิตซ์ที่มีความเร็วในการเปลี่ยนสถานะคือช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสสั้นๆ (เป็นหลักสิบของนาโนวินาที) เช่น สวิตซ์ที่เป็นมอสเฟตมีค่าเดดไทม์น้อยๆ เช่น 1-2 ไมโครวินาที ส่วนสวิตซ์ที่เป็นไทรสเตอร์มักต้องการค่าเดดไทม์ที่มากกว่าทั้งนี้เพราะช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสที่มากกว่า ดังนั้นเดดไทม์ขึ้นอยู่กับชนิดของสวิตซ์สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้

ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.12 โดยรูปที่ 2.12 (ก) เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งกิ่ง รูปที่ 2.12 (ข) เป็นแรงดันควบคุมเกิดในอุดมคติ รูปที่ 2.12 (ค) เป็นแรงดันควบคุมเกิดของสวิตซ์ที่ได้ชดเชยผลของเดดไทม์แล้ว โดยมีหลักการง่ายๆคือทุกๆขาลงของแรงดันควบคุมเกิดให้คงที่ และทุกๆขาขึ้นให้หน่วงเวลาไปเท่ากับเดดไทม์ เพื่อไม่ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์ในกึ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดดไทม์ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไหลอด กล่าวคือ

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลอดเป็นบวก (i_A) มีทิศทางไหลออกจากจุด A ในรูปที่ 2.12 (ง) หากไหลอดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $i_A > 0$ ช่วงเวลาเดดไทม์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าลดลงเพราะไดโอด D_{A-} นำกระแส ทำให้ V_{AN} ลดลงเป็นศูนย์เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ V_{AN} ลดลง

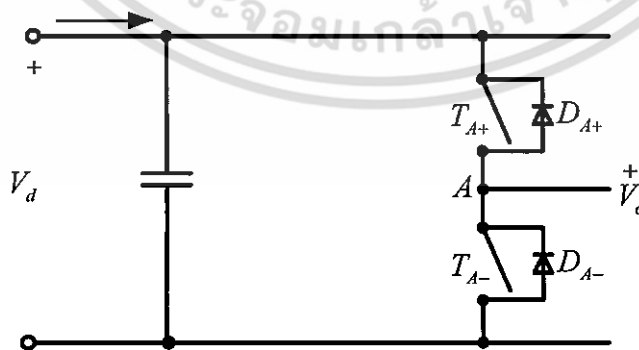
เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลอดเป็นลบ (i_A) มีทิศทางไหลเข้าจุด A ในรูปที่ 2.12 (จ) เมื่อ $i_A < 0$ ช่วงเวลาเดดไทม์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะไดโอด D_{A+} นำกระแส ทำให้ V_{AN} มีค่าเป็น $+V_d$ เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ V_{AN} มีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงมีค่าดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) สรุปได้ว่าเดดไทม์มากมีผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปด้วย

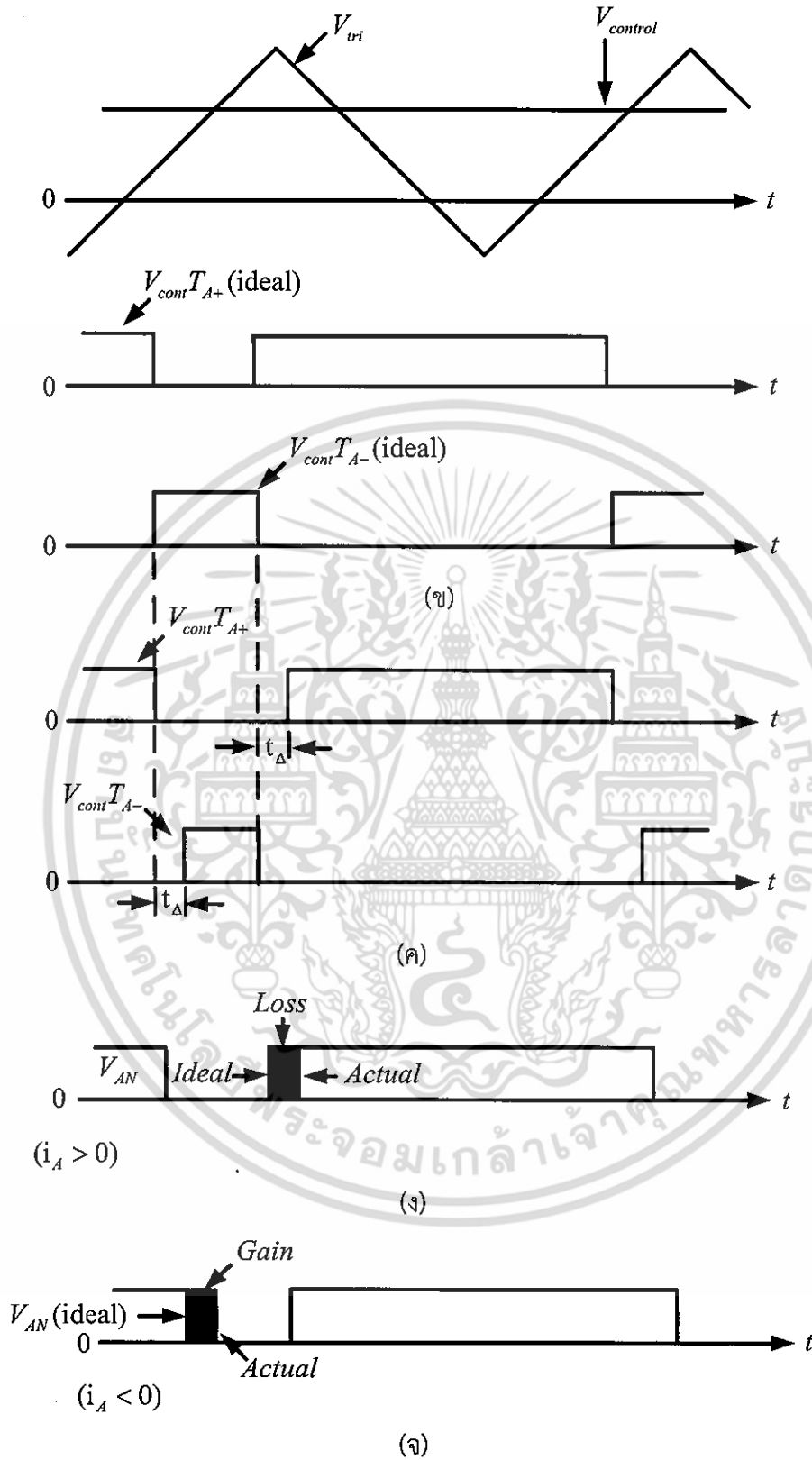
$$V_e = (V_{Ao})_{ideal} - (V_{Ao})_{actual} \tag{2.9}$$

$$V_e = \pm \frac{2 \cdot (\text{deadtime})}{T_s} \cdot V_d \tag{2.10}$$

ข้อดีของเดดไทม์ คือ การทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ แต่หากมีค่าเดดไทม์มากเกินไปก็มีผลต่อรูปคลื่นสัญญาณทางด้านเอาต์พุต โดยขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไหลอด ส่วนข้อเสียของเดดไทม์ คือ การเกิดฮาร์มอนิกที่ความถี่รอบข้างความถี่สวิตชิง และที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับต่ำๆ อันเป็นผลเสียต่อสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์



(ก)

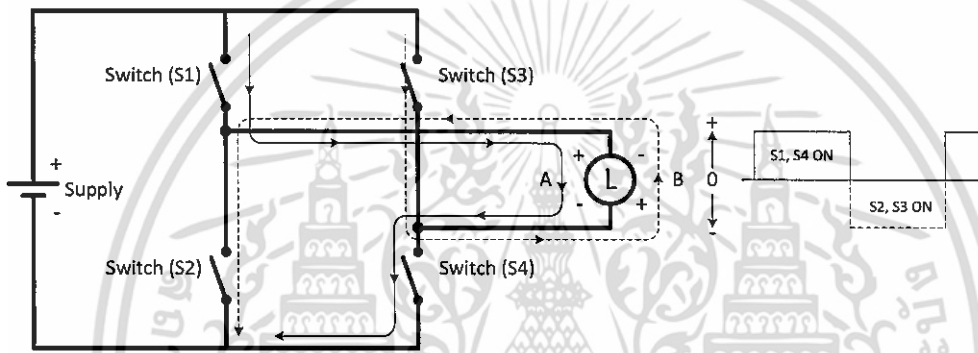


รูปที่ 2.12 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

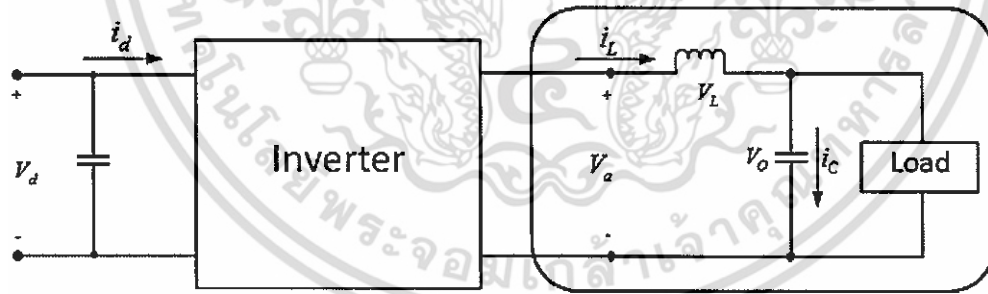
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ [8]

ทำการควบคุมวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.13 โดยทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีขนาดคงที่ ขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยทำการควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีระบบเชิงเส้น สมมติว่า ความถี่สวิตชิ่งของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์มีค่าสูงเพียงพอ ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีดับเบิลยูเอ็มสามารถถูกละเลยได้ ดังนั้นพลวัตของระบบขึ้นอยู่กับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) และโพลดังแสดงในรูปที่ 2.14 ที่อยู่ในกรอบสีแดง วงจรรองความถี่ต่ำผ่านประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุซึ่งมีค่าความต้านทานภายใน แต่มีค่าน้อยมากจึงสามารถละเลยค่าความต้านทานภายในในวงจรรองได้



รูปที่ 2.13 วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.14 วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ และวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 2.14 ทำการหาปริภูมิสแตตโดยใช้กฎกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ดังนั้นกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)

$$V_a = V_L + V_o$$

$$V_a = L \frac{di_L}{dt} + V_o$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law, KCL)

$$i_L = i_C + i_o$$

$$i_L = C \frac{dV_o}{dt} + i_o$$

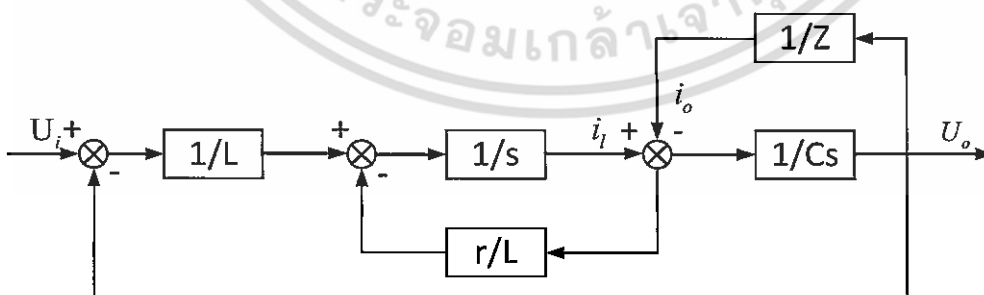
$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - i_o$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{i_o}{C}$$

ทำให้ได้ปริภูมิสแตต ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \times i_o$$

จากปริภูมิสแตตทำให้ได้แผนภาพโมเดลของระบบวงเปิดของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภาพโมเดลของระบบวงเปิดของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

แผนภาพในรูปที่ 2.15 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{Z}{ZCLs^2 + (L+rZC)s + (r+Z)} \quad (2.11)$$

$$L = 25 \text{ mH}$$

$$C = 65.7 \text{ } \mu\text{F}$$

$$r = 0$$

โดยที่ L, C และ r คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำของตัวกรอง ค่าของตัวเก็บประจุของตัวกรอง และค่าของตัวต้านทานในตัวกรอง โดยสามารถละเลยค่าตัวต้านทาน (r) ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ได้เนื่องจากมีขนาดเล็กพอ จึงสามารถให้ $r=0$ ได้ และ Z คืออิมพีแดนซ์ของโหลด โดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

2.3 การควบคุมแบบคงทน [13,14]

2.3.1 เสถียรภาพ และสมรรถนะของระบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมป้อนกลับมีข้อดีเมื่อมีสัญญาณรบกวน การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และความไม่แน่นอนต่างๆเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการป้อนกลับที่ไม่เหมาะสมสามารถสร้างปัญหาได้ร้ายแรงกว่าระบบควบคุมวงเปิดถ้าหากระบบวงปิดไม่เสถียร ดังนั้น คุณสมบัติที่เรียกได้ว่าสำคัญที่สุดของระบบป้อนกลับใดๆก็คือความมีเสถียรภาพ เพราะหากระบบป้อนกลับไม่เสถียรก็เป็นการไร้ประโยชน์ที่จะทำการควบคุมใดๆ เพราะระบบไม่สามารถตอบสนองในรูปแบบที่ต้องการได้ ในงานอุตสาหกรรมระบบที่ไม่เสถียรอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องจักร ชิ้นงานหรืออุปกรณ์รอบข้าง รวมถึงอาจเป็นอันตรายกับผู้ใช้งานด้วย

ในทางปฏิบัติแล้วความมีเสถียรภาพเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบใดๆทำงานด้วยความน่าเชื่อถือ ดังนั้นระบบป้อนกลับที่ดีต้องมีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพในสภาวะการทำงาน ความไม่แน่นอน และสัญญาณรบกวนต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ วิธีหนึ่งในการวิเคราะห์ว่าระบบวงปิดจะสูญเสียเสถียรภาพได้ยากง่ายเพียงใดนั้นสามารถวัดได้จากค่าที่เรียกว่า ส่วนเผื่อเสถียรภาพ (stability margins) เช่น ในการนิยามระบบ SISO คือ ส่วนเผื่ออัตราขยาย และเฟส (gain and phase margins) ระบบที่สามารถรักษาเสถียรภาพได้ดีภายใต้ความไม่แน่นอนและการรบกวนเรียกว่ามีความทนทานด้านเสถียรภาพ (robust stability)

อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพไม่ใช่คุณสมบัติของระบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวที่ต้องการ มิฉะนั้นแล้วระบบวงเปิดที่มีเสถียรภาพดีอยู่แล้วคงไม่ต้องการการควบคุมใดๆอีก จุดมุ่งหมายหลักของการควบคุมคือต้องการให้สิ่งที่ถูกควบคุมทำงานหรือมีผลตอบสนองในรูปแบบที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันผลกระทบของเอาต์พุตที่เกิดจากสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดจากการโมเดลต้องเกิดน้อยที่สุด

ค่าที่ใช้อธิบายคุณสมบัติการควบคุมเหล่านี้เรียกว่า สมรรถนะ (performance) ของระบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับกรณีของเสถียรภาพ ระบบที่ยังคงมีสมรรถนะที่ดีภายใต้ความไม่แน่นอนเรียกว่ามี ความทนทานด้านสมรรถนะ (robust performance)

2.3.2 ผลตอบสนองวงปิด

รูปที่ 2.16 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ต และตัวควบคุมถูกแทนด้วย P และ C ตามลำดับ สัญญาณต่างๆประกอบด้วย คำสั่งอินพุต (r) เอาต์พุตของระบบ (y) เอาต์พุตของตัวควบคุม (u) ค่าแตกต่างที่วัดได้ (e) สัญญาณรบกวนที่อินพุต (d_i) และเอาต์พุต (d_o) และสัญญาณรบกวนจากการวัด (n) กรณีที่มีสัญญาณรบกวนที่อินพุตจะตั้งเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น v เพื่อให้แตกต่างกับอินพุตของพลาเน็ตที่มีสัญญาณรบกวนอยู่ด้วย มีนิยามชื่อเรียกต่อไปนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open-loop transfer function)

$$L(s) = P(s)C(s) \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันความไว (sensitivity function)

$$S(s) = (1+L(s))^{-1} \quad (2.13)$$

ฟังก์ชันเติมเต็มความไว (complementary sensitivity function)

$$T(s) = L(s)(1+L(s))^{-1} \quad (2.14)$$

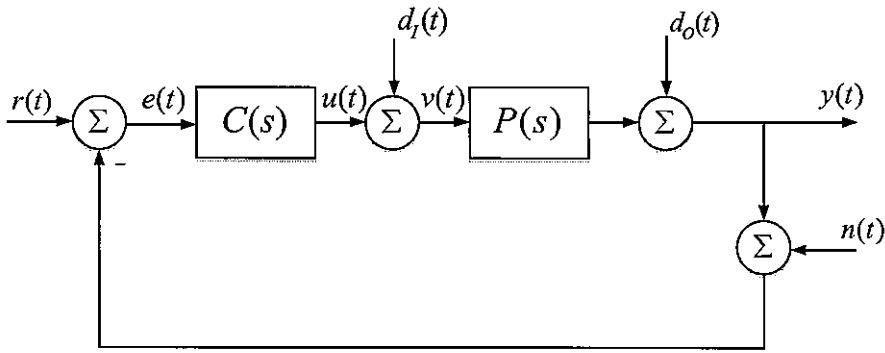
จากนิยามข้างต้นสามารถหาผลตอบสนองของระบบวงปิดได้เป็น

$$Y(s) = S(s)D_o(s) + T(s)(R(s) - N(s)) + S(s)P(s)D_r(s) \quad (2.15)$$

$$E(s) = S(s)(R(s) - N(s) - D_o(s) - P(s)D_r(s)) \quad (2.16)$$

$$U(s) = C(s)S(s)(R(s) - N(s) - D_o(s)) + T(s)D_r(s) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO)

เห็นได้ว่าฟังก์ชัน $S(s)$ และ $T(s)$ เป็นตัวสำคัญของการควบคุม หากต้องการให้เอาต์พุตของระบบตามรอยคำสั่งอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ $e=r-y=0$ ต้องพยายามทำให้ $S(s)$ เข้าสู่ศูนย์ ในขณะที่เดียวกันไม่ต้องการให้มีสัญญาณรบกวนจากการวัด (n) มีผลกระทบกับเอาต์พุต (y) ดังนั้นจึงต้องพยายามทำให้ $T(s)$ เข้าสู่ศูนย์ แต่จากนิยามของ $S(s)$ และ $T(s)$ ได้ว่า

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (2.18)$$

สมการที่ (2.18) เรียกว่า เงื่อนไขบังคับทางพีชคณิต (algebraic constraint) ซึ่งเป็นสมการที่มีความสำคัญมากสำหรับการควบคุม เพราะเป็นตัวบ่งบอกว่าไม่สามารถทำให้ $S(s)$ และ $T(s)$ มีค่าน้อยพร้อมกันได้ วิธีการหลีกเลี่ยงคือต้องให้ฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองมีค่าน้อยที่ความถี่ต่างกัน โดยบังคับให้ $|S(j\omega)|$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง r และสัญญาณรบกวน d ในขณะที่บังคับให้ $|T(j\omega)|$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่สูง เพราะเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากการวัด n มากที่สุด โดยวิธีการออกแบบระบบควบคุมโดยจัดรูปของผลตอบสนองทางความถี่ของ $S(s)$ และ $T(s)$ ให้เป็นไปตามที่ต้องการมีชื่อเรียกว่า การจัดสรรฐานวงรอบ

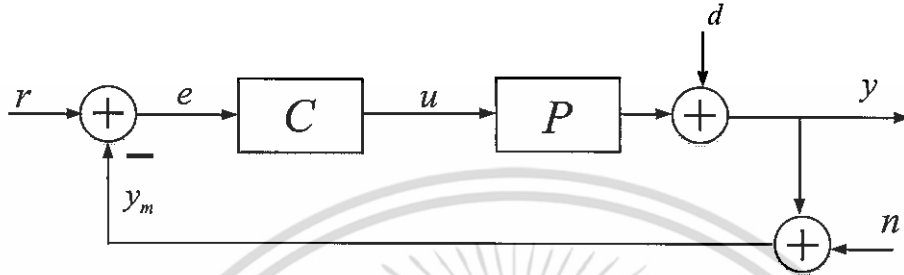
2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขบังคับบนผลตอบสนองความถี่

พิจารณาระบบควบคุมป้อนกลับดังเช่นในรูปที่ 2.17 โดยที่ P คือพลานต์ และ C คือตัวควบคุม สมมติให้ปัญหาการควบคุมคือต้องการให้ระบบตามรอยคำสั่ง r ที่ป้อนให้ ในขณะที่สัญญาณรบกวนภายนอก d และ n คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ โดย d มักแทนการรบกวนของกระบวนการที่อาจเกิดขึ้นที่อินพุตหรือเอาต์พุตของพลานต์ก็ได้ ส่วน n แทนสัญญาณรบกวนจากการวัด โดยต้องการให้ระบบวงปิดมีคุณสมบัติดังนี้

1. สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง ให้ค่าแตกต่างในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สมรรถนะในการขจัดการรบกวน
3. สมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด
4. ระบบต้องมีค่าเผื่อของเสถียรภาพที่ดี



รูปที่ 2.17 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO)

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.15) และ (2.16) สามารถแปลงความต้องการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขบังคับสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอน $S(s)$ และ $T(s)$

- | | |
|------------------|-------------------------------------------------------------|
| ความต้องการที่ 1 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $S(s) \ll 1$ |
| ความต้องการที่ 2 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $S(s) \ll 1$ |
| ความต้องการที่ 3 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $T(s) \ll 1$ |
| ความต้องการที่ 4 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ ไม่ต้องการให้ $S(s)$ หรือ $T(s) \gg 1$ |

ได้อธิบายแล้วว่า ความต้องการที่ให้ $S(s)$ และ $T(s)$ มีค่าน้อยพร้อมกันนั้นกระทำไม่ได้เนื่องจากเงื่อนไขบังคับทางพีชคณิต ซึ่งทางแก้ไขก็คือการแบ่งย่านความถี่ออกเป็นสามช่วง คือ LOW MID และ HIGH ดังนั้นเงื่อนไขบังคับที่สามารถเป็นไปได้คือ

- | | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| ความต้องการที่ 1 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ S(j\omega) \ll 1$ ในย่าน LOW |
| ความต้องการที่ 2 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ S(j\omega) \ll 1$ ในย่าน LOW |
| ความต้องการที่ 3 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ T(j\omega) \ll 1$ ในย่าน HIGH |
| ความต้องการที่ 4 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ ไม่ต้องการให้ $ S(j\omega) $ หรือ $ T(j\omega) \gg 1$ ในย่าน MID |

ถ้าให้ ω_l และ ω_h เป็นความถี่ที่แบ่งเขตระหว่างทั้งสามย่านความถี่ กล่าวคือ $LOW = (0, \omega_l)$, $MID = (\omega_l, \omega_h)$ และ $HIGH = (\omega_h, \infty)$ rad/s สามารถเขียนวัตถุประสงค์เชิงคุณภาพสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$|S(j\omega)|$ และ $|T(j\omega)|$ ได้ดังรูปที่ 2.18 โดยพื้นที่แรเงาเป็นเงื่อนไขบังคับที่ $|S(j\omega)|$ และ $|T(j\omega)|$ ไม่สามารถผ่านเข้าไปได้ หลังจากนั้นทำการแปลงเงื่อนไขบังคับทั้งหมดให้เป็นเงื่อนไขบังคับของ $L(s)$ โดยสามารถกระทำได้ดังนี้

- ย่านความถี่ LOW : เนื่องจาก $S(j\omega) = \frac{1}{1+L(j\omega)} \approx \frac{1}{L(j\omega)}$ เมื่อ $S(j\omega)$ มีค่าน้อย

ดังนั้น $|S(j\omega)| \ll 1$ จะสัมพันธ์กับ $|L(j\omega)| \gg 1$

- ย่านความถี่ HIGH : เนื่องจาก $T(j\omega) = \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \approx L(j\omega)$ เมื่อ $T(j\omega)$ มีค่าน้อย

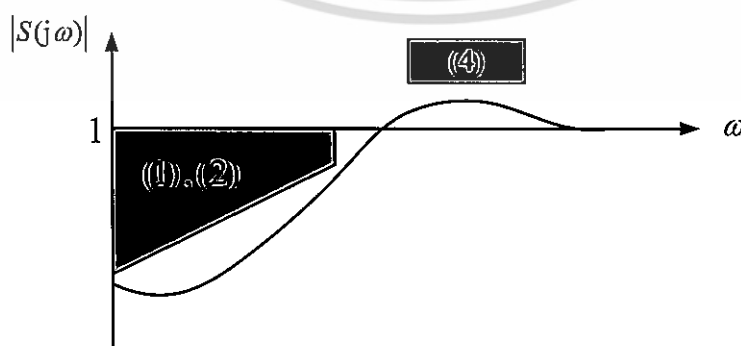
ดังนั้น $|T(j\omega)| \ll 1$ จะสัมพันธ์กับ $|L(j\omega)| \ll 1$

- ย่านความถี่ MID : เนื่องจากขนาดของ $S(j\omega)$ เป็นส่วนกลับของระยะห่างระหว่างจุด - 1 กับกราฟในควิสิทธ์ของ $L(j\omega)$ ดังนั้นเงื่อนไขบังคับบน $L(s)$ คือต้องการส่วนเฟสเพื่อเสถียรภาพที่ดี ซึ่งระบบต่างๆ จะกำหนดให้เงื่อนไขบังคับบนส่วนเฟส

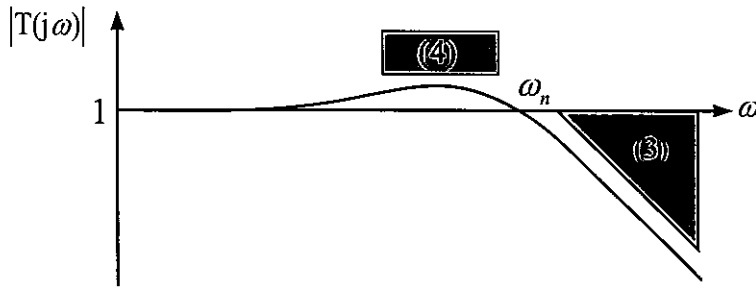
สามารถสรุปเงื่อนไขบังคับบน $L(s)$ ได้ดังนี้

| | |
|------------------|-------------------------------------------------------|
| ความต้องการที่ 1 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ L(j\omega) \gg 1$ ในย่าน LOW |
| ความต้องการที่ 2 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ L(j\omega) \gg 1$ ในย่าน LOW |
| ความต้องการที่ 3 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $ L(j\omega) \ll 1$ ในย่าน HIGH |
| ความต้องการที่ 4 | มีเงื่อนไขบังคับ คือ $L(j\omega)$ มีส่วนเฟสที่ต่ำ |

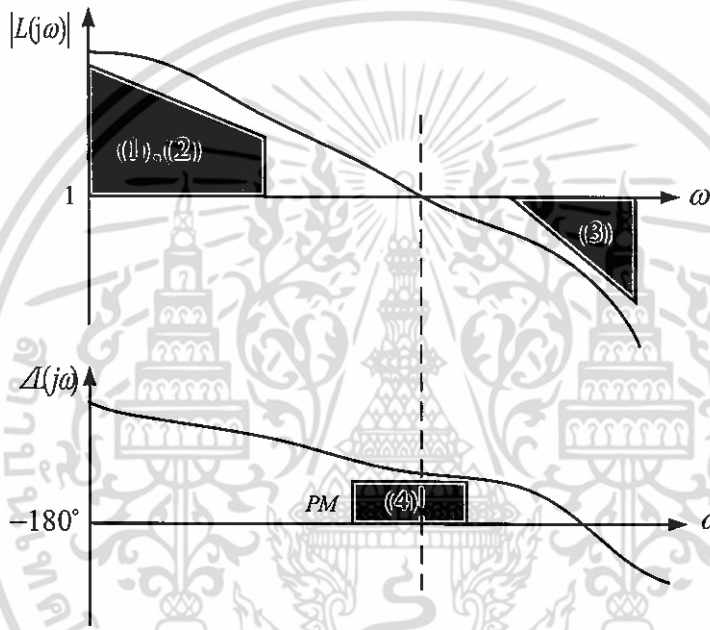
จากรูปที่ 2.19 แสดงภาพของเงื่อนไขบังคับ (ส่วนแรเงา) บนขนาดและเฟสของ $L(s)$ ซึ่งต้องออกแบบตัวควบคุมให้ $L(s)$ มีขนาดและเฟสอยู่ในเกณฑ์ที่บังคับไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 เงื่อนไขบังคับบน $|S(j\omega)|$ และ $|T(j\omega)|$



รูปที่ 2.19 เงื่อนไขบังคับบนแผนภาพโพลของ $L(s)$

2.3.4 การจัดรูปทั่วไปสำหรับปัญหาการควบคุม

เนื่องจากมีหลากหลายวิธีในการจัดรูปปัญหาการควบคุมป้อนกลับให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด H_2 และ H_∞ ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์หากสามารถสร้างกรอบการออกแบบที่เป็นทั่วไปสำหรับใช้จัดการกับปัญหาใดๆ รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพของกรอบการออกแบบระบบควบคุมดังกล่าว ที่นิยมเรียกว่า กรอบการออกแบบสมัยใหม่ โดย P คือ พลานต์วางนัยทั่วไป (generalized plant) และ K เป็นตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบ ในส่วนของอินพุตของ P ประกอบด้วย ตัวแปรควบคุม (control variables) u ที่กำเนิดโดยตัวควบคุม และ อินพุตภายนอก (exogenous inputs) w ที่รวมสัญญาณคำสั่งและสัญญาณรบกวนที่จุดต่างๆของระบบ ส่วนทางด้านเอาต์พุตประกอบด้วย z เรียกว่า เอาต์พุตสมรรถนะ (performance outputs) หรือ เอาต์พุตค่าแตกต่าง (error outputs) ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจไม่ได้มีการติดตั้งตัวตรวจจับเพื่อวัดค่าจริงในทางปฏิบัติ ส่วน เอาต์พุตจากการวัด (measurement outputs) y คือเอาต์พุตที่มีการวัดจริงและเป็นค่าที่ป้อนให้กับตัวควบคุม จำนวนของอินพุตและเอาต์พุตดังกล่าวจะมีเท่าใดก็ได้ขึ้นอยู่กับระบบที่ออกแบบและข้อกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการ โดยเมทริกซ์ถ่ายโอน P และ K ก็มีขนาดที่สัมพันธ์กับขนาดของเวกเตอร์ตัวแปรที่เป็นอินพุตและเอาต์พุต เมื่อเขียนเมทริกซ์ถ่ายโอนของพลาเน็ต

$$P = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

หรือหากแทนในรูปของสมการสถานะสแตต สามารถเขียนได้เป็น

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

และเมื่อมีตัวควบคุมจะได้ว่า

$$u = Ky \quad (2.21)$$

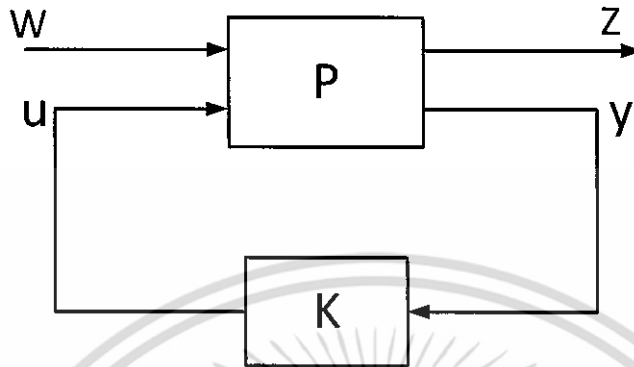
เรียกฟังก์ชันถ่ายโอนจาก w ไปยัง z คือ T_{zw} ว่าเป็นระบบวงปิด ซึ่งสามารถหาได้จาก การแปลงเศษส่วนเชิงเส้น (linear fractional transformation) เขียนแทนด้วย $F_l(P, K)$ เป็นการไม่ยากที่แสดงว่าสมการของระบบวงปิดเป็น ดังนี้

$$T_{zw} = F_l(P, K) = P_{zw} + P_{zu}(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw} \quad (2.22)$$

สิ่งสำคัญที่ต้องเข้าใจสำหรับกรอบการออกแบบ คือ T_{zw} ต้องประกอบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดทุกตัวที่สนใจคุณสมบัติของผลตอบสนองเอาต์พุตต่ออินพุต ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการขจัดสัญญาณรบกวน d ไม่ให้มีผลต่อเอาต์พุต y ของระบบ T_{zw} ก็ต้องมีฟังก์ชันถ่ายโอนจาก d ไปยัง y เป็นสมาชิก อาจกล่าวได้โดยรวมว่าการออกแบบวิธีสมัยใหม่นี้เป็นปัญหาการลดค่าของ T_{zw} คือต้องการตัวควบคุม K ที่ทำให้ตัวแทนของขนาดหรือนอร์มของ T_{zw} มีค่าน้อยที่สุด การหาตัวควบคุม K ที่เหมาะสมที่สุดนี้ถูกกระทำโดยอัลกอริธึมการสังเคราะห์ หลังจากที่ย้อนข้อมูลเข้าสู่กรอบการออกแบบแล้ว ซึ่งในบางกรณีมีการกระทำซ้ำโดยอัตโนมัติจนได้ตัวควบคุม K หน้าหลักของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ออกแบบคือใส่ข้อกำหนดคุณสมบัติระบบป้อนกลับที่ต้องการลงในพลาเน็ตวางนัยทั่วไป P อย่างถูกต้องและเหมาะสม



รูปที่ 2.20 กรอบการออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่

2.3.5 การควบคุมที่เหมาะสมที่สุด H_∞

เมื่ออ้างถึงกรอบการออกแบบทั่วไปในรูปที่ 2.20 ปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด H_∞ มาตรฐาน คือ การหาตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพ K ที่ให้ค่าต่ำสุดของ

$$\|T_{zw}\|_\infty = \|F_T(P, K)\|_\infty = \max_\omega \bar{\sigma}(F_T(P, K)(j\omega)) \tag{2.23}$$

ได้กล่าวแล้วว่านอร์ม H_∞ เป็นตัวแทนที่ดีของเสถียรภาพ และสมรรถนะ โดยเป็นค่ายอดของค่าเอกฐานสูงสุดของ $F_T(P(j\omega), K(j\omega))$ และแปรความหมายในโดเมนเวลาเป็นนอร์มสองที่ถูกเหนี่ยวนำ (induced 2-norm) (กรณีที่ยืดที่สุด) กำหนดให้ $z = F_T(P, K) w$ ได้ว่า

$$F_T(P, K) = \max \frac{\|z(t)\|_\infty}{\|w(t)\|_\infty} \tag{2.24}$$

โดยที่ $\|z(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty \sum_i |z_i(t)|^2 dt}$ เป็นนอร์มสองของเวกเตอร์เอาต์พุต

ในทางปฏิบัติไม่มีความจำเป็นที่ต้องได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหา H_∞ เพราะง่ายกว่าทั้งด้านการคำนวณและทฤษฎีในการที่หาตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดย่อย (suboptimal) คือ ตัวควบคุมที่ใกล้กับตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในเชิงนอร์ม H_∞ ให้ γ_{\min} เป็นค่าต่ำที่สุดของ $\|F_T(P, K)\|_\infty$ สำหรับทุกตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพ K ดังนั้นปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดย่อย H_∞ คือ : สำหรับค่า $\gamma > \gamma_{\min}$ ที่กำหนด หาตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพ K ที่ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\|F_1(P, K)\|_\infty < \gamma$$

ซึ่งสามารถหาคำตอบได้โดยอาศัยอัลกอริทึมของ Doyle และคณะ (1989) โดยการลดค่าของ γ ในการวนรอบแต่ละครั้งคำตอบเข้าหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สรุปรูปสำหรับอัลกอริทึมนี้ภายใต้สมมติฐานทั้งหมดที่กล่าวมาที่ทำให้ปัญหาง่ายขึ้น

อัลกอริทึมทั่วไปของปัญหา H_∞ : สำหรับกรอบการออกแบบทั่วไปดังรูปที่ 2.20 และบรรยายโดยสมการ (2.19)-(2.21) ดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถหาตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพ $K(s)$ ที่ทำให้ $\|F_1(P, K)\|_\infty < \gamma$ ถ้าหากว่า

- (i) $X_\infty \geq 0$ เป็นคำตอบของสมการ ARE

$$A^T X_\infty + X_\infty A + C_1^T C_1 + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty = 0 \quad (2.25)$$

ที่ทำให้ $\text{Re} \lambda_i [A + (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty] < 0, \forall i$ และ

- (ii) $Y_\infty \geq 0$ เป็นคำตอบของสมการ ARE

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T + B_1 B_1^T + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty = 0 \quad (2.26)$$

ที่ทำให้ $\text{Re} \lambda_i [A + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty] < 0, \forall i$ และ

- (iii) $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$

ตัวควบคุมดังกล่าวทั้งหมดเขียนได้เป็น $K = F_1(K_c, Q)$ โดยที่

$$K_c(s) = \begin{bmatrix} A_\infty & -Z_\infty L_\infty & Z_\infty B_2 \\ F_\infty & 0 & I \\ -C_2 & I & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty, L_\infty = -Y_\infty C_2^T, Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (2.28)$$

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (2.29)$$

และ $Q(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสม เสถียร และมีคุณสมบัติ $\|Q\|_\infty < \gamma$ สำหรับ $Q(s) = 0$ ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K(s) = K_{c11}(s) = -Z_\infty L_\infty (sI - A)^{-1} F_\infty \quad (2.30)$$

ที่ถูกเรียกว่า ตัวควบคุมกลาง (central controller) และมีจำนวนของสเตตเท่ากับพลาเนตว่างนัยทั่วไป $P(s)$ ตัวควบคุมกลางสามารถเขียนแยกในรูปของตัวประมาณค่าสเตตหรือตัวสังเกต ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + B_1 \underbrace{\gamma^{-2} B_1^T X_\infty}_{w_{\text{worst}}} x + B_2 u + Z_\infty L_\infty (C_2 x - y) \quad (2.31)$$

ร่วมกับตัวป้อนกลับสเตต

$$u = F_\infty x \quad (2.32)$$

โดยการเปรียบเทียบตัวสังเกตในสมการ (2.31) กับคาลมานฟิลเตอร์ พบว่ามีนิพจน์ที่เพิ่มเข้ามาคือ $B_1 w_{\text{worst}}$ โดย w_{worst} สามารถแปลความหมายได้เป็นการประมาณค่าสัญญาณรบกวน (อินพุตจากภายนอก) ที่แย่ที่สุด

การวนรอบ γ : หากต้องการตัวควบคุมที่ให้ค่า γ ใกล้เคียงกับ γ_{\min} ในพิกัดที่กำหนด สามารถใช้วิธีแบ่งครึ่ง (bisection) สำหรับ γ จนกระทั่งค่ามีความถูกต้องเพียงพอ สามารถทดสอบโดยอัลกอริธึมข้างบนว่าค่า γ ที่ได้ในแต่ละรอบมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า γ_{\min}

สามารถแบ่งกรรมวิธีในการออกแบบตัวควบคุม H_∞ ได้เป็นสองแบบ คือ แนวทางการจัดสรรฐานวงรอบฟังก์ชันถ่ายโอน และแนวทางพื้นฐานสัญญาณ สำหรับแบบแรกนั้นใช้การหาค่าเหมาะที่สุด H_∞ ในการจัดรูปค่าเอกฐานของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนดบนย่านความถี่ ค่าเอกฐานสูงสุดสามารถถูกจัดรูปได้โดยทำให้อยู่ใต้ขอบเขตจำกัดที่กำหนด เพื่อให้ได้สมรรถนะ แบนด์วิธ และอัตราการลดค่าในย่านความถี่สูงตามต้องการ สำหรับแนวทางบนพื้นฐานสัญญาณต้องการลดพลังงานของสัญญาณความแตกต่าง (เอาต์พุตสมรรถนะในรูปที่ 2.20) ลงให้ต่ำที่สุด ขึ้นกับอินพุตภายนอกที่กำหนด โดยอินพุตเหล่านี้อาจรวมเอาต์พุตจากความไม่แน่นอน สัญญาณรบกวนโดยปกติ สัญญาณรบกวนจากการวัด และสัญญาณคำสั่ง

2.3.5.1 การควบคุม H_∞ แบบความไวผสม

ปัญหาการควบคุม H_∞ แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) เป็นชื่อที่ตั้งให้กับปัญหาการจัดสรรฐานวงรอบฟังก์ชันถ่ายโอน โดยที่ฟังก์ชันความไว $S = (I + GK)^{-1}$ ถูกจัดรูปพร้อมกับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตัวอื่น เช่น KS หรือฟังก์ชันเติมเต็มความไว $T = I - S$ โดยได้เห็นแล้วถึงความสำคัญของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่ามีปัญหาการควบคุมค่า โดยต้องการกำจัดการรบกวน (d) ที่เอาต์พุตของพลาเน็ตและสมมติว่าการรบกวนจากการวัดค่อนข้างไม่มีความสำคัญ ปัญหานี้ไม่มีการตามรอยคำสั่ง ดังนั้นจึงสมเหตุสมผลที่ทำการจัดรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด S และ KS ในลักษณะหนึ่งอันดับความอิสระ คงจำได้ว่า S เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนจาก d ไปยังเอาต์พุต และ KS เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนจาก d ไปยังเอาต์พุตของตัวควบคุม ดังนั้นสามารถใช้ KS เป็นตัวจำกัดแบนด์วิธของตัวควบคุมเพื่อไม่ให้พลังงานสัญญาณควบคุมสูงเกินไป

โดยปกติแล้วการรบกวน (d) เป็นสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ จึงสามารถถูกกำจัดได้หากทำให้ค่าเอกฐานของ S มีค่าน้อยในย่านความถี่ต่ำ วิธีการจัดรูปดังกล่าวกระทำโดยเลือกตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน $w_1(s)$ ที่มีแบนด์วิธเท่ากับสัญญาณรบกวน (d) และทำการหาตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพที่ลดค่าของ $\|w_1 S\|_\infty$ แต่การจัดรูปเพียงเท่านั้นไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เพราะได้คำนึงถึงแต่ฟังก์ชันถ่ายโอนเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น สำหรับพลาเน็ตที่เป็นแบบเฟสต่ำสุดได้ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุดที่มีอัตราขยายตลอดย่านความถี่จนถึงอนันต์คือไม่มีการจำกัดแบนด์วิธนั่นเอง หากพลาเน็ตเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุดความต้องการด้านเสถียรภาพเป็นตัวจำกัดแบนด์วิธของระบบโดยอ้อม อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเหมาะสมกว่าที่จะหาค่าต่ำสุดของสมการที่ (2.33)

$$\left\| \begin{bmatrix} w_1 S \\ w_2 KS \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (2.33)$$

โดยที่ w_2 เป็นตัวกรองความถี่สูงผ่านที่มีความถี่ตัดข้ามประมาณเท่ากับแบนด์วิธของระบบวงปิดที่ต้องการ

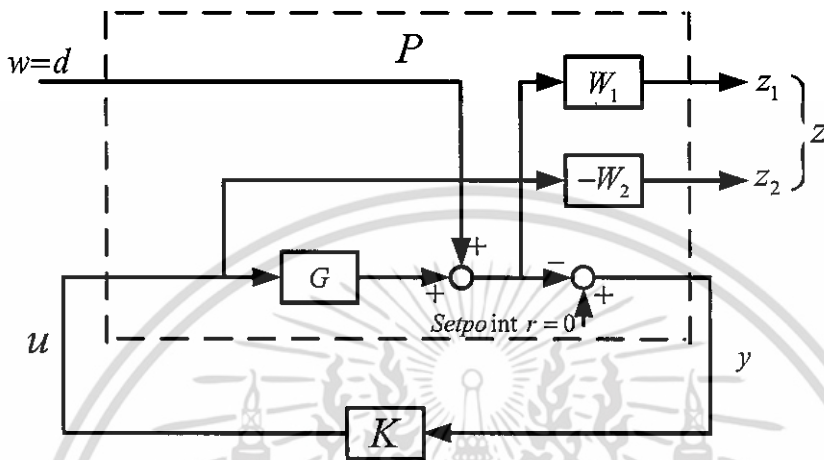
สำหรับกรณีทั่วไปฟังก์ชันน้ำหนักอาจอยู่ในรูปของเมทริกซ์ $W_1(s)$ และ $W_2(s)$ ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีหลายแกนเนลที่มีแบนด์วิธต่างกัน สามารถเลือกน้ำหนักในแนวทแยงมุมของเมทริกซ์

ในการที่จะแสดงวิธีการจัดปัญหาความไวผสมให้อยู่ในกรอบการออกแบบทั่วไป คิดว่าการรบกวน (d) เป็นสัญญาณภายนอกเพียงตัวเดียวของระบบ นิยามเอาต์พุตความแตกต่าง $z = [z_1^T \quad z_2^T]^T$ โดย $z_1 = W_1 y$ และ $z_2 = -W_2 u$ ดังเช่นในรูปที่ 2.21 ซึ่งจากรูปสามารถแสดงให้เห็นได้โดยง่ายว่า $z_1 = W_1 S w$ และ $z_2 = W_2 K S w$ เป็นไปตามที่ต้องการ และสมาชิกของพลาเน็ตวางนัยทั่วไป P ถูกกำหนดได้ดังนี้

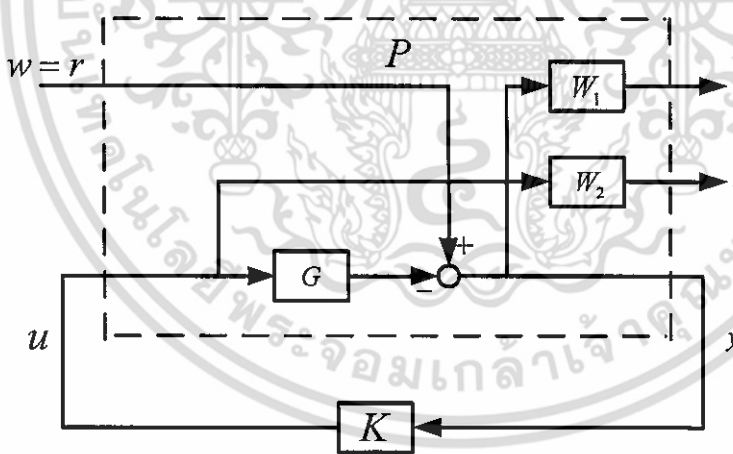
$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \end{bmatrix} & P_{12} &= \begin{bmatrix} W_1 G \\ -W_2 \end{bmatrix} \\ P_{21} &= -I & P_{22} &= -G \end{aligned} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาความไวผสม S/KS อีกรูปแบบหนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 เมื่อพิจารณาการตามรอยคำสั่ง ดังนั้นอินพุตภายนอกเป็นคำสั่งอ้างอิง (r) และเอาต์พุตความแตกต่างคือ $z_1 = -W_1e = W_1(r - y)$ และ $z_2 = W_2u$ สำหรับปัญหาการตามรอยคำสั่งนี้ได้เช่นเดียวกับกรณีปัญหาการคุมค่าในรูปที่ 2.21 ว่า $z_1 = W_1Sw$ และ $z_2 = W_2KS w$



รูปที่ 2.21 ปัญหาความไวผสม S/KS สำหรับการคุมค่า



รูปที่ 2.22 ปัญหาความไวผสม S/KS สำหรับการตามรอยคำสั่ง

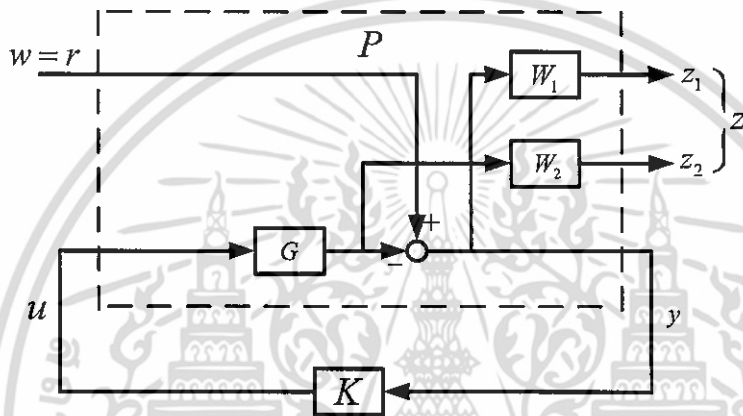
ปัญหาความไวผสมสำหรับกรณีลำดับความอิสระเดียวที่มีประโยชน์อีกรูปแบบหนึ่ง คือ การหาตัวควบคุมสร้างเสถียรภาพที่จะให้ค่าต่ำสุดของสมการที่ (2.35)

$$\left\| \begin{bmatrix} w_1 S \\ w_2 T \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการจัดรูปฟังก์ชันเติมเต็มความไว T เป็นประโยชน์สำหรับการจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด (n) และความทนทานด้านเสถียรภาพต่อความไม่แน่นอนเชิงผลคูณที่เอาต์พุตของพลาเน็ต ปัญหาความไวผสม S/T สามารถจัดเข้ากรอบการออกแบบทั่วไปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยได้สมาชิกของพลาเน็ตวางนัยทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \end{bmatrix} & P_{12} &= \begin{bmatrix} -W_1 G \\ W_2 G \end{bmatrix} \\ P_{21} &= I & P_{22} &= -G \end{aligned} \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.23 ปัญหาความไวผสม S/T

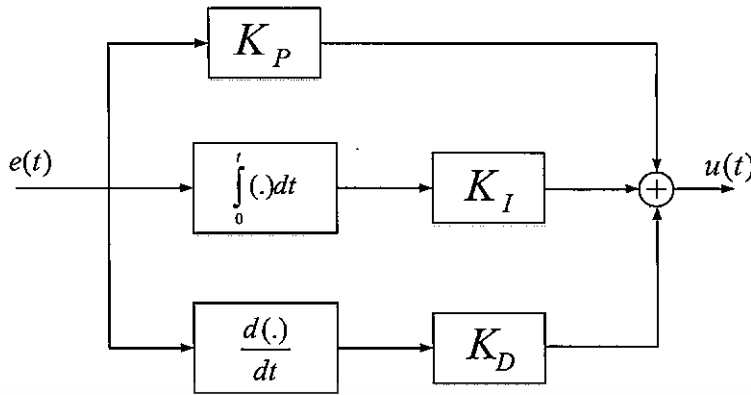
2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี [12,18]

ในการออกแบบหรือการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี ผู้ใช้งานสามารถปรับจูนหรือปรับค่าเกนดังกล่าวได้ด้วยตนเองแบบลองผิดลองถูก (trial and error) หรือสามารถใช้กฎการปรับจูนต่างๆ ได้ ตัวควบคุมพีไอดีมีโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.24 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งประกอบด้วยหน่วยสัดส่วนที่มีค่าเกน K_p หน่วยปริพันธ์ที่มีค่าเกน K_I และหน่วยอนุพันธ์ที่มีค่าเกน K_D ดังนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.37)$$

โดยที่ $e(t)$ และ $u(t)$ คือ ความผิดพลาด และสัญญาณควบคุม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดี

หน่วยทั้งสามของตัวควบคุมพีไอดีมีคุณสมบัติ หรือพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ดังนี้

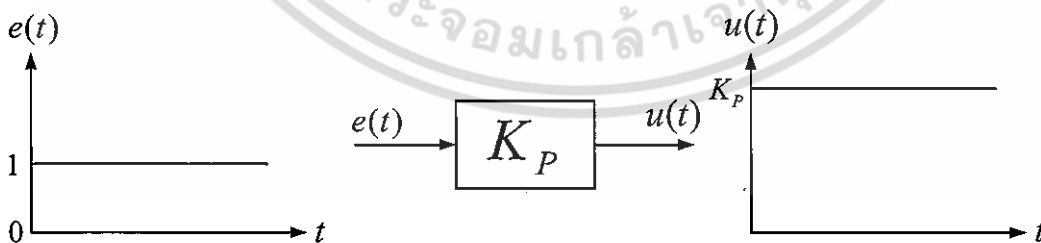
2.4.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยสัดส่วนเพียงอย่างเดียว หรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมดังกล่าวได้รับความผิดพลาด ($e(t)$) ระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง โดยนำความผิดพลาดนี้มาคูณกับค่าเกน K_p เพื่อขยายความผิดพลาด ทำให้เกิดสัญญาณควบคุม ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.38)$$

นั่นคือสัญญาณควบคุมแปรผันโดยตรงกับความผิดพลาด ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

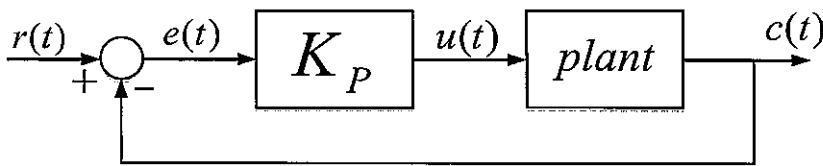
$$G_c(s) = K_p \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.25 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

เนื่องจากสัญญาณควบคุมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความผิดพลาด ถ้าความผิดพลาดคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สัญญาณควบคุมคือสัญญาณขั้นบันไดที่มีค่าเท่ากับ K_p ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.25 ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบสัดส่วน เมื่อค่าเกนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_p เพิ่มขึ้น สัญญาณควบคุมมีค่ายอด (peak) และขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ผลตอบสนองมีความรวดเร็วมากขึ้น



รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

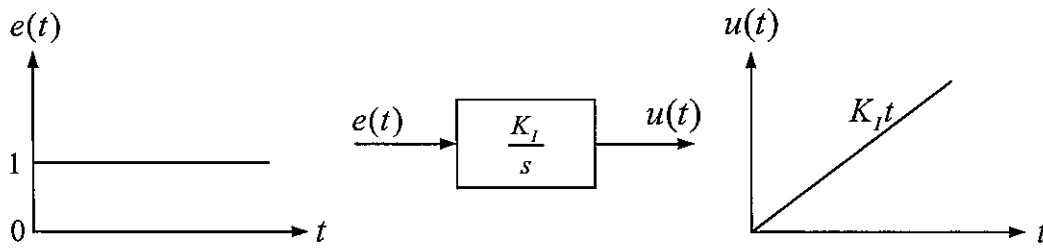
เมื่อตัวควบคุมแบบสัดส่วนชดเชยพลวัตของพลานต์ที่เป็นระบบแบบชนิดศูนย์ (Type 0 System) ตัวควบคุมดังกล่าวไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ ถ้าต้องการลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ค่าเกน K_p ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพลานต์คือระบบที่มีอันดับสองขึ้นไป การเพิ่มค่าเกนมากเกินไป อาจทำให้ผลตอบสนองเกิดการพุ่งเกิน (overshoot) หรือเกิดการแกว่ง (oscillation) ที่มีขนาดมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบวงปิดขาดเสถียรภาพได้และในทางปฏิบัติ การเลือกใช้ค่าเกน K_p ที่มีค่าสูงมากอาจไม่สามารถดำเนินการได้ เพราะสัญญาณควบคุมทางกายภาพมีขอบเขตจำกัด กล่าวคือสัญญาณควบคุมทางกายภาพมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่แน่นอนค่าหนึ่ง ถ้าสัญญาณควบคุมที่ได้จากการคำนวณมีขนาดมากกว่าขอบเขตของสัญญาณทางกายภาพทำให้สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุมเกิดการอิ่มตัว (Saturation)

2.4.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยปริพันธ์เพียงอย่างเดียวหรือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ ตัวควบคุมดังกล่าวได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง โดยนำความผิดพลาดนี้มาหาปริพันธ์ (อินทิเกรต) เทียบกับเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คูณกับค่าเกน K_I ที่มีหน่วยต่อวินาที ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมดังนี้

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.40)$$

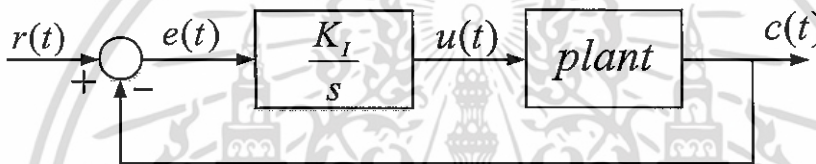
เมื่อตัวควบคุมแบบปริพันธ์ได้รับสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยซึ่งแสดงในรูปที่ 2.27 ค่าปริพันธ์ของความผิดพลาดตั้งแต่เวลาเริ่มต้น $t=0$ จนถึงเวลา t ปัจจุบัน หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดตั้งแต่เวลาเริ่มต้น $t=0$ จนถึงเวลา t ปัจจุบัน ดังนั้นถ้าความผิดพลาดมีค่าบวกคงที่สัญญาณควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นด้วยอัตราคงที่ (ความชันคงที่) เทียบกับเวลาที่ผ่านไป



รูปที่ 2.27 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์มีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.28 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และพลานต์คือระบบแบบชนิดศูนย์ (Type 0 System) ตัวควบคุมดังกล่าวกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ ถ้าต้องการใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ค่าเกน K_I ต้องได้รับการปรับจนให้มีค่าเหมาะสม ตัวควบคุมแบบปริพันธ์มีจุดด้อยคือการเพิ่มการพุงเกินของผลตอบสนอง การใช้ค่าเกน K_I ที่ไม่เหมาะสมอาจเกิดการแกว่งของผลตอบสนองได้ ถ้าเป็นพลานต์หรือระบบที่มีอันดับสูง ผลตอบสนองที่ได้อาจมีสมรรถนะที่น่าพอใจหรือไม่สามารถยอมรับได้

2.4.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

ในระบบควบคุมวงปิดที่ใช้หน่วยอนุพันธ์เพียงอย่างเดียวหรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนอง โดยนำความผิดพลาดนี้มาหาอนุพันธ์ที่เวลาปัจจุบัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คูณกับค่าเกน K_D ที่มีหน่วยวินาที ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมดังนี้

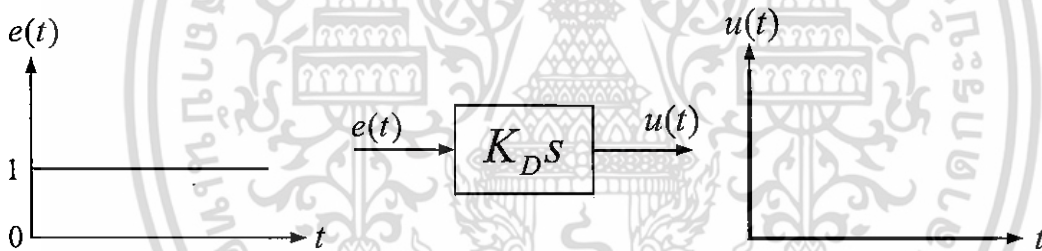
$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

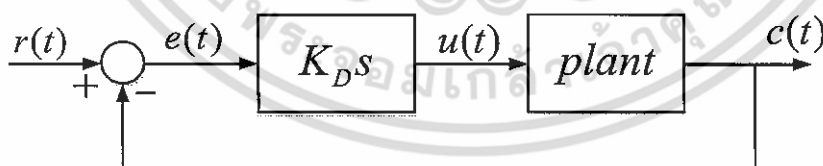
ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะให้สัญญาณควบคุมที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด ถ้าความผิดพลาดมีค่าคงที่ สัญญาณควบคุมจะเท่ากับศูนย์ เมื่อตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ได้รับสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยซึ่งแสดงในรูปที่ 2.29 สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse) ที่เวลา $t=0$ เท่านั้น ต่อมาสัญญาณควบคุมเป็นศูนย์ ทำให้ไม่สามารถใช้งานตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เพียงลำพังตัวเดียวได้และต้องใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์พร้อมกับตัวควบคุมแบบอื่น ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$G_c(s) = K_D s \quad (2.43)$$

ในระบบวงปิด ถ้าตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ชดเชยพลวัตของพลานต์คือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ และพลานต์คือระบบแบบชนิดหนึ่ง (Type 1 System) หรือระบบแบบชนิดสอง (Type 2 System) ตัวควบคุมดังกล่าวจะหักล้างโพลศูนย์ ($s=0$) หนึ่งตัวหรือหักล้างตัวปริพันธ์ของพลานต์หนึ่งตัว ทำให้ระบบมีแบบลดลงหนึ่งตัวเลข การใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เพิ่มความเร็วของผลตอบสนองต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.29 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 2.30 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ถ้าตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีค่าเกน K_D ที่เหมาะสม ผลตอบสนองจะมีการพุ่งเกินและขนาดของการแกว่งลดลง ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีจุดด้อยคือการไม่สามารถใช้งานเพียงลำพังตัวเดียวได้ ทำให้ต้องใช้งานพร้อมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนเสมอ การไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ รวมถึงการทำให้ระบบมีผลตอบสนองช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้งานมีหลายรูปแบบ เช่น ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพีหรือตัวควบคุมไอ การเพิ่มค่าเกน K_p K_I และ K_D มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของผลตอบสนองซึ่งสรุปได้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มค่าเกน K_p K_I และ K_D

| ผลตอบสนองวงปิด (Closed-Loop Response) | ช่วงเวลายกขึ้น (Rise time) | การพุ่งเกิน (Overshoot) | ช่วงเวลาที่เข้าที่ (Settling time) | ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady-state error) | เสถียรภาพ (Stability) |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| K_p เพิ่ม | ลดลง | เพิ่มขึ้น | เพิ่มขึ้นเล็กน้อย | ลดลง | ไม่ปรับปรุง |
| K_I เพิ่ม | ลดลงเล็กน้อย | เพิ่มขึ้น | เพิ่มขึ้น | ลดลงมาก | ไม่ปรับปรุง |
| K_D เพิ่ม | ลดลงเล็กน้อย | ลดลง | ลดลง | เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย | ปรับปรุงดีขึ้น |

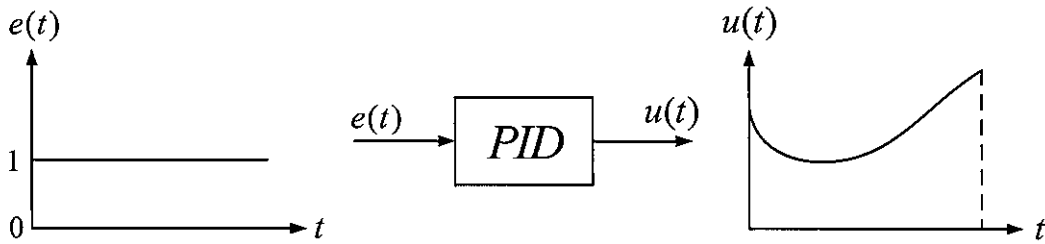
2.4.4 การควบคุมแบบสัดส่วน - ปริพันธ์ - อนุพันธ์ (ตัวควบคุมพีไอดี)

เมื่อผู้ใช้งานได้นำการควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบปริพันธ์ และการควบคุมแบบอนุพันธ์ มาใช้ประโยชน์พร้อมกัน ทำให้เกิดวิธีการควบคุมและตัวชดเชยที่เรียกว่า “การควบคุมแบบพีไอดี” และตัวควบคุมพีไอดี ตามลำดับ ทำให้ได้รับผลดีในการชดเชยระบบ (พลาเน็ต) ซึ่งระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีเป็นระบบแบบป้อนกลับและสัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีจะเกิดจากการนำสัญญาณควบคุมของหน่วยสัดส่วน สัญญาณควบคุมของหน่วยปริพันธ์ และสัญญาณควบคุมของหน่วยอนุพันธ์มารวมกันในเวลาปัจจุบัน เป็นดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.44)$$

และตัวควบคุมแบบพีไอดีมีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ (2.37) เมื่อความผิดพลาดคือสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย สัญญาณควบคุมที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอดีแสดงได้ในรูปที่ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 พฤติกรรมของตัวควบคุมแบบพีไอดีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ตัวควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มซีโรจำนวน 2 ตัวและเพิ่มโพลจำนวน 1 ตัว นอกจากนี้ระบบมีขนิดเพิ่มขึ้น 1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงได้ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

2.4.5 การทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี

การที่ได้ผลตอบสนองที่เหมาะสมของตัวควบคุมแต่ละแบบนั้นขึ้นอยู่กับอันดับและชนิดของระบบเป็นสำคัญ ระบบแต่ละระบบมีค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่าง ๆ กันออกไป ทั้งนี้ยังต้องรวมไปถึงข้อกำหนดคุณลักษณะในการออกแบบด้วย เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ผู้ใช้และผู้ออกแบบพึงพอใจ

การให้ได้มาซึ่งค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบทั่วไปที่อาจมีอันดับสูง เป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก ในที่นี้นำเสนอวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยวิธีการของซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method)

การทดสอบด้วยวิธีการของซิกเลอร์นิโคล

การทดสอบวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ต่อระบบควบคุมเป็นแบบวงรอบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีด้วยการป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบระบบด้วยสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

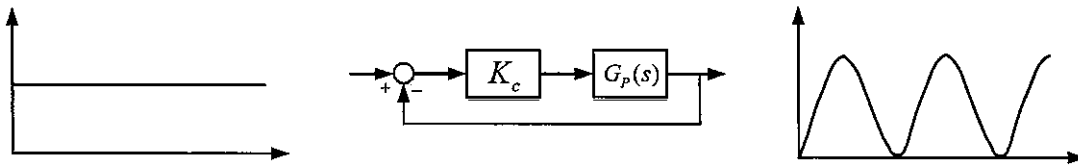
ขั้นตอนที่ 3 ปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้น จนกระทั่งเกิดผลตอบสนองแบบไม่มีการหน่วง (Undamped)

ดังรูปที่ 2.33 และ 2.34

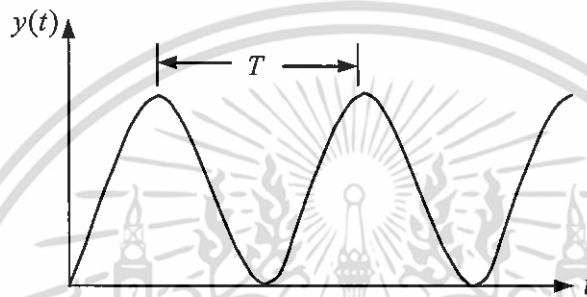
ขั้นตอนที่ 4 บันทึกค่าเกณฑ์ (K_c) และคาบเวลาของการแกว่งตัว (T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 นำค่าเกนและคาบเวลาของการแกว่งที่ได้ ไปเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ



รูปที่ 2.33 การทดสอบระบบด้วยวิธีการของซิกเลอร์นิโคล



รูปที่ 2.34 ลักษณะของผลตอบสนองที่ได้

นำค่าเกนและคาบเวลาของการแกว่งมาเข้าสู่สูตรเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมของระบบควบคุมแบบพีไอดี ตามฟังก์ชันถ่ายโอนนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

หรือ

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

โดยที่

$$K_I = \frac{K_p}{T_i}, K_D = K_p T_d$$

ค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบเป็นดังตารางที่ 2.4

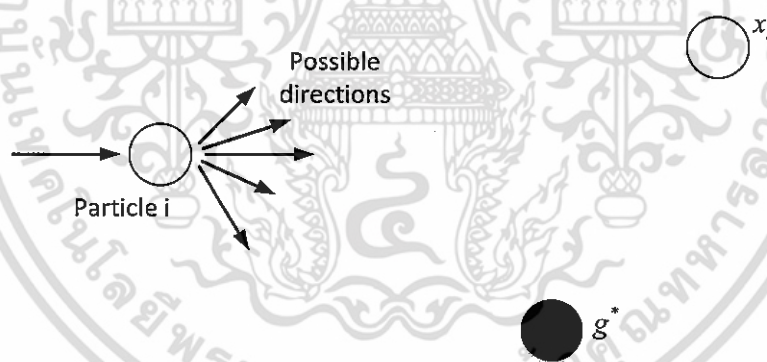
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของซิกเลอร์นโคล

| ตัวควบคุม | K_P | K_I | K_D |
|--------------------|-----------|-------------------|------------------------|
| ตัวควบคุมแบบพี | $0.5K_c$ | | |
| ตัวควบคุมแบบพีไอ | $0.45K_c$ | $0.45K_c / 0.83T$ | |
| ตัวควบคุมแบบพีไอดี | $0.6K_c$ | $0.6K_c / 0.5T$ | $0.6K_c \times 0.125T$ |

2.5 พาติเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) [15]

วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบ Particle Swarm Optimization หรือเรียกว่า PSO เป็นวิธีการหาคำตอบแบบสุ่มประเภทหนึ่งโดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังรูปที่ 2.35 ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในเชิงวิศวกรรมอย่างหลากหลาย โดยในการหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นการหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ให้มีค่าที่ดีที่สุดซึ่งอาจหมายถึงค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุดตามแต่วัตถุประสงค์ของปัญหา ในส่วนของงานวิจัยนี้ นำการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบพาติเคิลสวอมออปติไมเซชันมาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุม ทำให้สามารถนำตัวควบคุมมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.35 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในวิธีการพาติเคิลสวอมออปติไมเซชัน

รูปที่ 2.35 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดย x_i^* คือคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคในขณะนั้น ส่วน g^* คือคำตอบที่ดีที่สุดของทุกอนุภาคในขณะนั้น

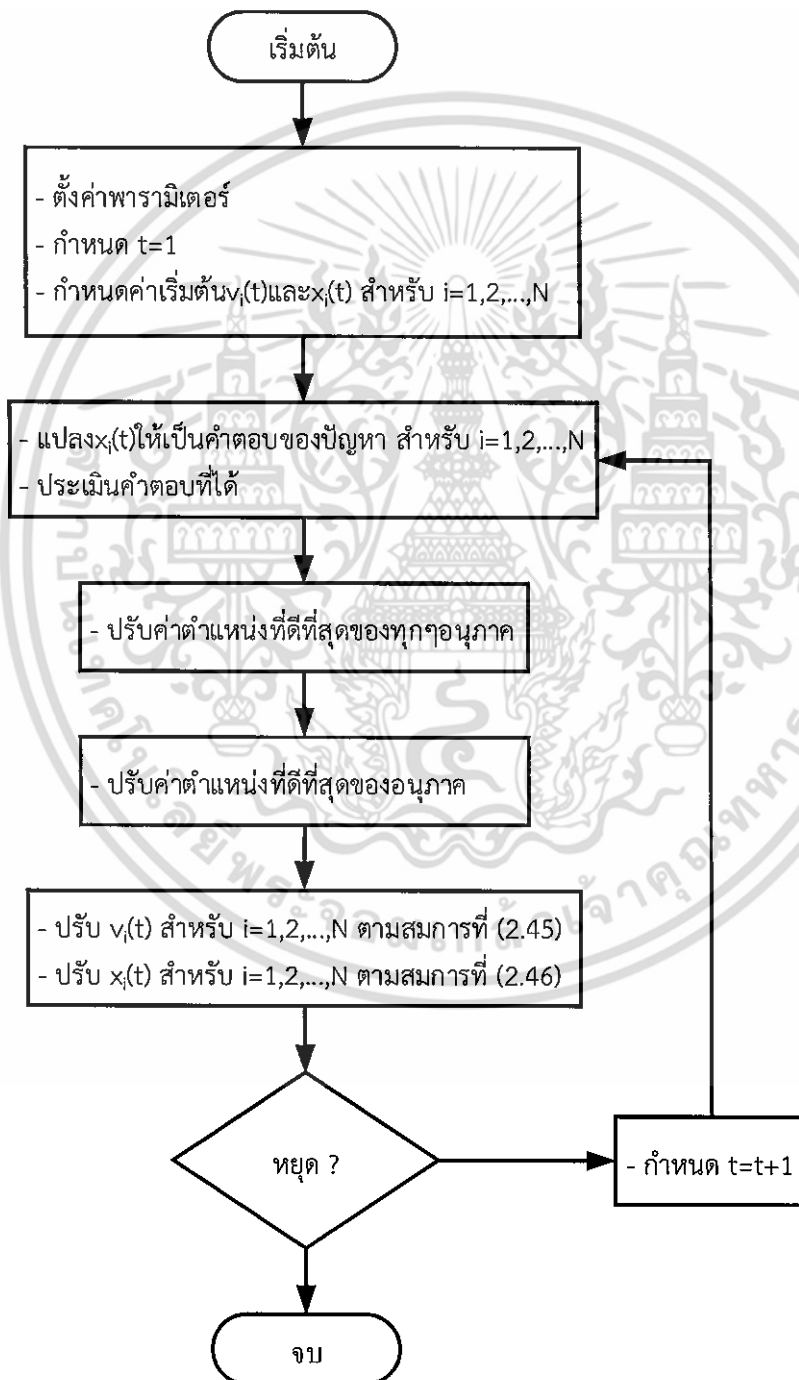
วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบพาติเคิลสวอมออปติไมเซชันอนุภาคแต่ละตัวมีการปรับความเร็วใหม่ตามสมการที่ (2.45) และทำการปรับตำแหน่งของอนุภาคใหม่ด้วยสมการที่ (2.46)

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \alpha \varepsilon_1 \cdot [g^* - x_i^t] + \beta \varepsilon_2 \cdot [x_i^* - x_i^t] \quad (2.45)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x_i และ v_i คือเวกเตอร์ของตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค i ตามลำดับ ε_1 และ ε_2 คือเวกเตอร์ที่เกิดจากการสุ่มโดยมีค่าอยู่ระหว่าง $0-1$ α และ β คือค่าคงที่ความเร่ง โดยตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคควรกระจายอย่างเป็นรูปแบบและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคสามารถให้มีค่าเท่ากับ 0 ได้ $v_i^{t=0} = 0$ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของพาทิเคิลสวอมมอปติไมเซชันดังแผนภาพในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของพาทิเคิลสวอมมอปติไมเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้ และวงจรรีโวลต์เตอร์

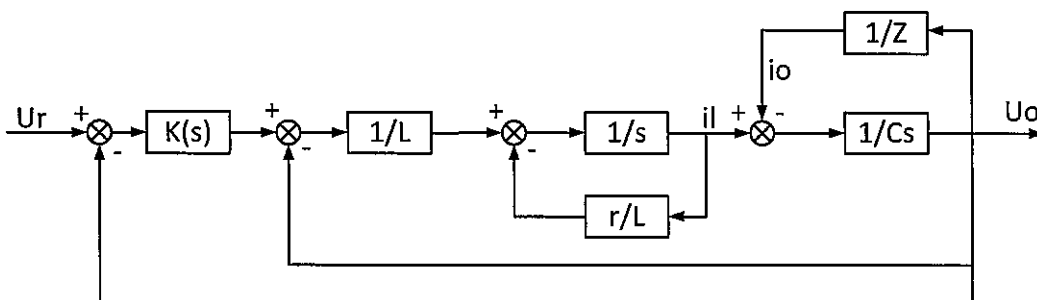
ในบทนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรรีโวลต์เตอร์และการออกแบบวงจรรีโวลต์เตอร์ การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนทำได้โดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรีโวลต์เตอร์มาออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) และทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมเพื่อให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน

3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน

การจัดการกับปัญหาของเสถียรภาพที่เกิดจากความไม่แน่นอนของโหลดในวงจรรีโวลต์เตอร์โดยใช้ตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) โดยมีจุดมุ่งหมายของการออกแบบ คือ ต้องการสมรรถนะการติดตามคำสั่งที่ดี และรักษาเสถียรภาพของระบบในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลดที่มีค่าอยู่ในช่วงที่ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบตามหัวข้อที่ 2.2 เป็นดังนี้

$$G_a(s) = \frac{Z}{ZCLs^2 + (L+rZC)s + (r+Z)} \quad (3.1)$$

ทำการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดให้มีค่าเท่ากับ $100-1,000 \Omega$ ($Z=100-1,000 \Omega$) เห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมไม่สนใจโหลดที่มีตัวเหนี่ยวนำ (L) เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.1 แผนภาพการควบคุมแบบคงทน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\|T_{wz}\|_{\infty} < 1 \text{ หรือ } \left\| \frac{W_1 S}{W_2 T} \right\|_{\infty} < 1 \quad (3.2)$$

ในรูปที่ 3.1 เป็นแผนภาพการควบคุมแบบคงทน ซึ่ง $K(s)$ เป็นตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบ การควบคุมเอชอินฟินิตี้ที่มีฟังก์ชันน้ำหนักมาตรฐานแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งเป็นวิธีความไวผสม S/T (mixed-sensitivity) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การสังเคราะห์ตัวควบคุม $K(s)$ เพื่อให้อัตราขยายจาก w ถึง z มีค่าน้อยกว่าหนึ่งตามสมการที่ (3.2) โดยการเลือกฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 และ W_2 อย่างเหมาะสม ซึ่งมีการออกแบบการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักที่เหมาะสม
2. ดำเนินการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบคงทน

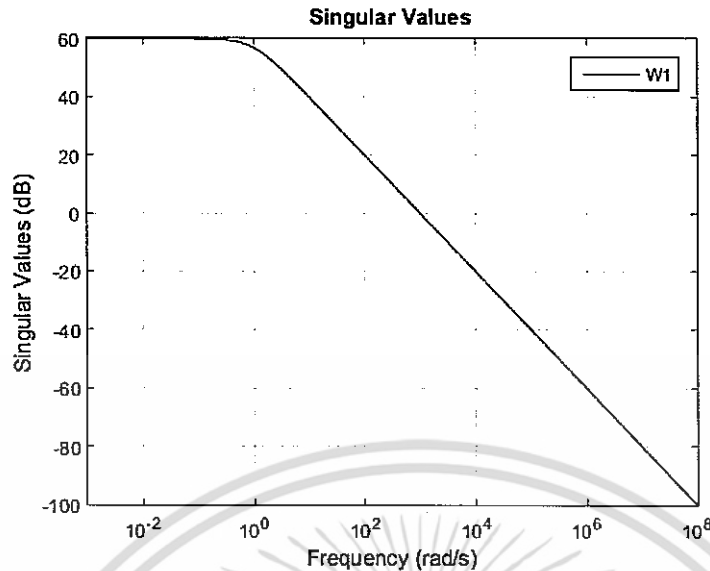
3.1.1 การเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสำหรับสมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง และสมรรถนะในการจัดการรบกวน

สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง และสมรรถนะในการจัดการรบกวนที่ดีต้องทำให้ฟังก์ชันความไว $S(s)$ มีอัตราขยายต่ำในย่านความถี่ต่ำ โดยฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 ทำหน้าที่เป็นแม่พิมพ์ในการหล่อขึ้นรูปของ $S(s)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$|S(j\omega)| < \frac{1}{|W_1(j\omega)|}, \forall \omega \quad (3.3)$$

ดังนั้น ในการเลือกฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 จึงต้องเลือกให้มีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ต่ำในขณะที่ทำให้มีอัตราขยายต่ำในย่านความถี่สูงด้วยวิธีการสุ่มค่าแล้วดูผลตอบสนอง ทำให้ได้ฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 ตามสมการที่ (3.4) และค่าเอกฐานของฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 แสดงในรูปที่ 3.2

$$W_1 = \frac{1}{0.001s + 0.001} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.2 ค่าเอกฐานของฟังก์ชันนำหน้า W_1

จากรูปที่ 3.2 เห็นได้ว่าฟังก์ชันนำหน้า W_1 มีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ต่ำ และมีอัตราขยายต่ำในย่านความถี่สูงตามที่ต้องการ

3.1.2 การเลือกฟังก์ชันนำหน้าสำหรับความคงทน

การจัดรูปฟังก์ชันเติมเต็มความไว $T(s)$ เป็นประโยชน์สำหรับการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด และความทนทานด้านเสถียรภาพต่อความไม่แน่นอนเชิงผลคูณที่เอาต์พุตของพลานต์ โดยความไม่แน่นอนเชิงผลคูณสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta(s) = \sigma \left(\frac{G_a - G_{aN}}{G_{aN}} \right) \quad (3.5)$$

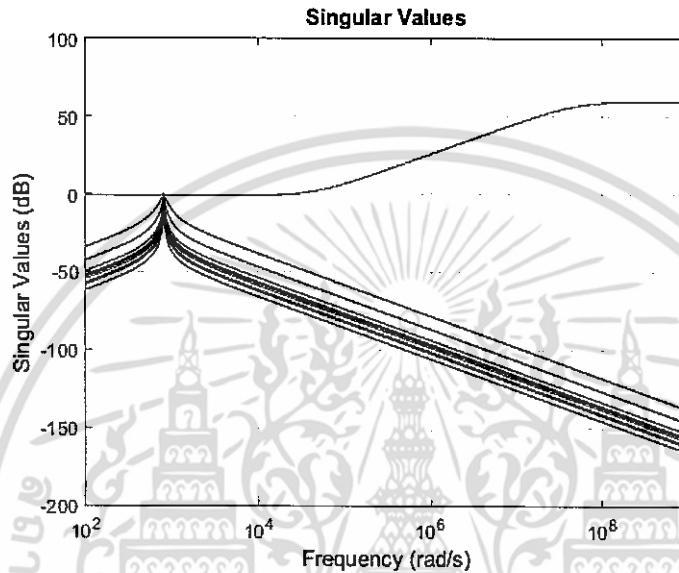
โดยที่ G_a คือ โมเดลจริงของพลานต์ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.1) และ G_{aN} คือ โมเดลโนมินัลของพลานต์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังนี้

$$G_{aN}(s) = \frac{Z_N}{Z_N C L s^2 + (L + r Z_N C) s + (r + Z_N)} \quad (3.6)$$

โดยที่ Z_N คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดโดยมีค่าเท่ากับ 500Ω ดังนั้น ทำการเลือกฟังก์ชันนำหน้า W_2 ด้วยวิธีการสุ่มค่าแล้วดูผลตอบสนองจากกรณีที่แย่ที่สุดของความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ โดยให้ฟังก์ชันนำหน้า W_2 อยู่เหนือกรณีที่แย่ที่สุดแสดงในรูปที่ 3.3 (กรณีที่แย่ที่สุด คือ กราฟสีดำที่มีค่าเอกฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุด) เพื่อให้บรรลุความคงทนที่ต้องการต้องทำให้ $\|W_2 T\|_\infty < 1$ ทำให้ได้ฟังก์ชันน้ำหนัก W_2 เป็นดังนี้

$$W_2 = \frac{1 \times 10^{-4} s + 4.5}{1 \times 10^{-7} s + 5} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.3 ค่าเอกฐานของ $\Delta(s)$ และฟังก์ชันน้ำหนัก W_2

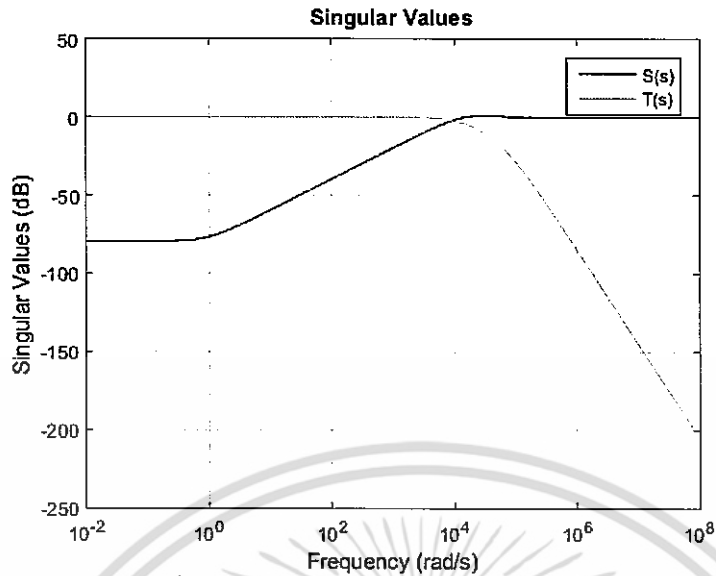
3.1.3 การสังเคราะห์ตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity)

หลังจากเลือกฟังก์ชันน้ำหนักที่จำเป็นในการออกแบบตัวควบคุมแบบความไวผสม (mixed-sensitivity) อย่างเหมาะสมแล้ว สามารถใช้โปรแกรมแมทแลบในการสังเคราะห์ตัวควบคุม $K(s)$ โดยการใช้ฟังก์ชัน mixsyn ก็กับการกำหนด G_{oN} , W_1 และ W_2 ผลของตัวควบคุมที่ได้เป็นดังนี้

$$K(s) = \frac{9.485 \times 10^7 s^3 + 4.743 \times 10^{15} s^2 + 1.444 \times 10^{17} s + 2.887 \times 10^{21}}{s^4 + 5.015 \times 10^7 s^3 + 7.419 \times 10^{12} s^2 + 3.081 \times 10^{17} s + 3.052 \times 10^{17}} \quad (3.8)$$

โดยตัวควบคุม $K(s)$ ตัวนี้ทำให้ได้ค่าของ $\|T_{WZ}\|_\infty = 0.9061$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ระบบนี้มีความคงทน และแสดงค่าเอกฐานของ $S(s)$ และ $T(s)$ ในรูปที่ 3.4 โดย $S(s)$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่ต่ำทำให้ระบบมีสมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง และสมรรถนะในการจัดการรบกวนที่ดี ส่วน $T(s)$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่สูงทำให้ระบบมีความคงทน และสมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดที่ดี

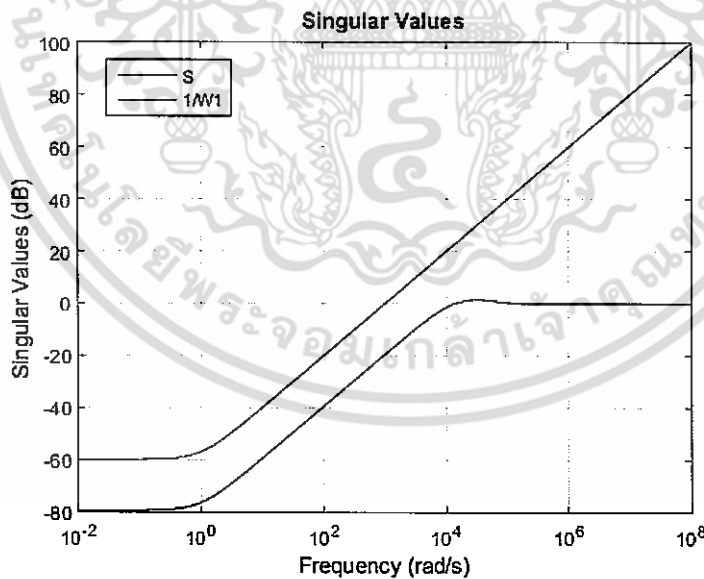
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ค่าเอกฐานของ $S(s)$ และ $T(s)$

เมื่อทำการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบคงทนแล้ว เห็นได้ว่าฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 ที่ได้ทำการเลือกใช้ เป็นไปตามสมการที่ (3.3) โดยค่าของ $\frac{1}{W_1(j\omega)}$ มีค่ามากกว่า $|S(j\omega)|$ ในทุกๆความถี่ แสดงในรูปที่

3.5



รูปที่ 3.5 ค่าเอกฐานของ $S(s)$ และ $1/W_1(s)$

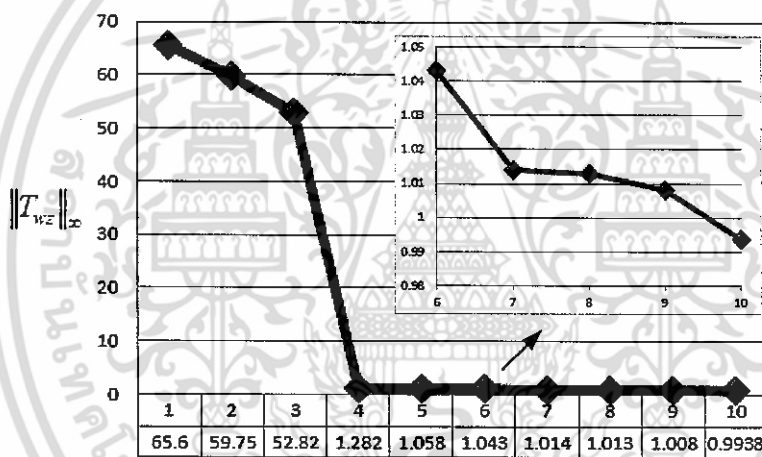
3.2 การกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีเอ็ดดี

เมื่อทำการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบคงทนแล้ว ทำให้ได้ตัวควบคุมแบบคงทนที่ลำดับสูงซึ่งยาก ต่อการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุม $K(s)$ ไปเป็นตัว ควบคุมแบบพีเอ็ดดีโดยมีโครงสร้างตามสมการที่ (3.9) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ง่ายกว่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการพาทิเคิลสวอมมออปติไมเซชัน (PSO) เพื่อให้มีค่า $\|T_{wz}\|_{\infty} < 1$

$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.9)$$

หลักการการทำงานของวิธีการพาทิเคิลสวอมมออปติไมเซชัน (PSO) แสดงในหัวข้อที่ 2.5 ซึ่งทำการวนรอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีจำนวน 10 รอบ จำนวนอนุภาคเท่ากับ 500 อนุภาค ค่าคงที่ความเร่งเท่ากับ 2 และขอบเขตของค่า $K_p = 0-1 \times 10^3$, $K_i = 0-1 \times 10^4$ และ $K_d = 0-1 \times 10^0$ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีค่า $\|T_{wz}\|_{\infty}$ ในแต่ละรอบแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการหาค่า $\|T_{wz}\|_{\infty}$ ในแต่ละรอบ

จากรูปที่ 3.6 เห็นได้ว่าค่าของ $\|T_{wz}\|_{\infty}$ มีค่าลู่อเข้าสู่ค่าที่น้อยที่สุดจนมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง บ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีความคงทนเนื่องจากมีค่าของ $\|T_{wz}\|_{\infty}$ น้อยกว่าหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ทำให้ค่าของ $\|T_{wz}\|_{\infty}$ น้อยกว่าหนึ่งเป็นดังนี้

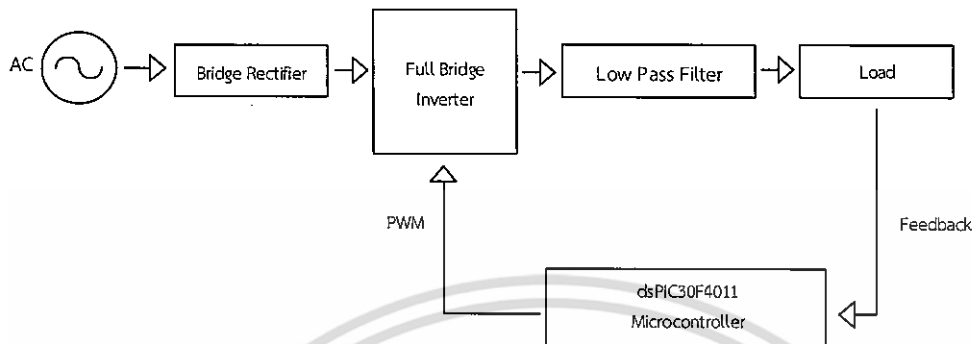
$$K_p = 363.5783$$

$$K_i = 4.6446 \times 10^3$$

$$K_d = 0.0780$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีนี้ทำให้ได้ค่าของ $\|T_{wz}\|_{\infty} = 0.9938$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ระบบนี้มีความคงทนเหมือนกับตัวควบคุมที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเอชอินฟินิตี้ ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุม



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.7 ทำการออกแบบวงจรที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ (v_{rms}) ผ่านเข้าหม้อแปลงปรับค่าได้เพื่อทำการลดระดับแรงดันลงมาเข้าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวช่วยในการลดการกระเพื่อมของแรงดันให้น้อยลงก่อนเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์กับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ออกมา และนำสัญญาณไปขับขาเกตของมอสเฟต ทำให้ได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเป็นแบบยูนิโพลาร์ก่อนนำไปเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อกรองความถี่สูงออกได้สัญญาณไซน์ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) ก่อนจ่ายเข้าโหลด ส่งค่าสัญญาณแรงดันตกคร่อมโหลดโดยผ่านวงจรลดและยกระดับแรงดันเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลผ่านทางตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยสัญญาณที่ได้ถูกนำมาประมวลผลเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงขนาด 50 โวลต์ (v_{rms}) เพื่อนำมาควบคุมการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งมีวงจรดังต่อไปนี้

3.3.1 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ในการควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล โดยสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้หลายภาษา ได้แก่ แอสเซมบลี เบสิก ซี และพาสคาล แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีด้วยกันหลายประเภทหรือตระกูลแบ่งตามสถาปัตยกรรม (การผลิต และกระบวนการทำงานระบบการประมวลผล) บางประเภทสามารถเขียนได้ทุกภาษา แต่บางประเภทใช้ได้บางภาษาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม รวมถึงผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยตระกูล dsPIC30F4011 ในการทำการทดลอง

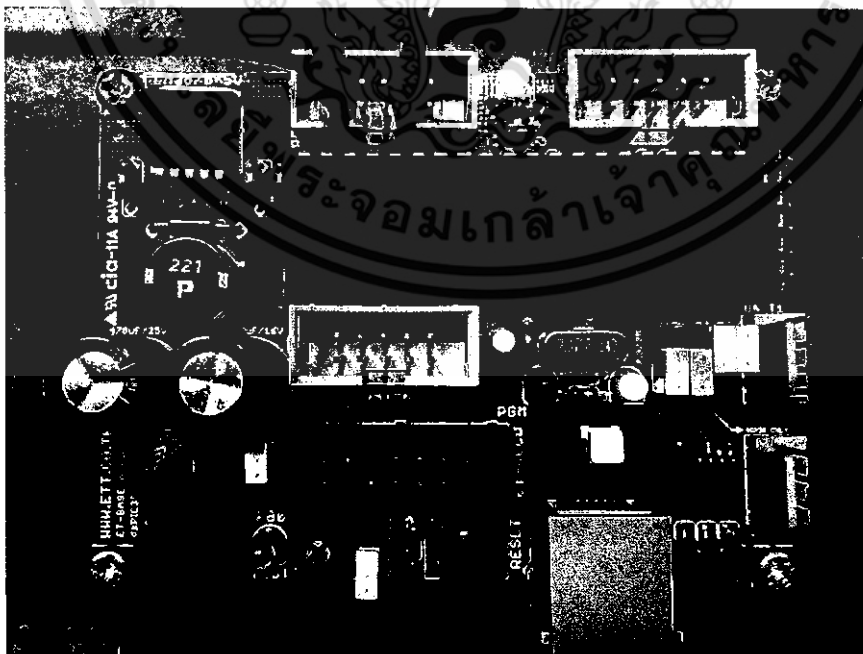
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F4011 เป็นตัวประมวลผลดิจิทัลขนาด 16 บิต ของบริษัท ไมโครชิพ จำกัด โดยใช้เป็นชุดควบคุมดิจิทัลของการทดลองนี้ โดยใช้ฟังก์ชันของ dsPIC30F4011 ในการสร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เพื่อไปสั่งวงจรรอบได้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ขับขาเกดของมอเตอร์ และเป็นตัวประมวลผลกริยาควบคุม โดยรับสัญญาณป้อนกลับจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรรีเวอร์เตอร์ โดยใช้ตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC)

จากรูปที่ 3.8 แสดงวงจควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC30F4011 ที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่ง dsPIC30F4011 นี้รับสัญญาณอนาล็อก 1 สัญญาณ ได้แก่ สัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากวงจรรีเวอร์เตอร์ทางช่อง AN0 โดย dsPIC30F4011 ทำการอ่านค่าของสัญญาณรับเข้าตัวแปลงอนาล็อก โดยรับแรงดันเอาต์พุตจากวงจรรีเวอร์เตอร์มาประมวลผลผ่านกริยาควบคุม สัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เป็นสัญญาณดิจิทัลออกทางช่อง RE0 RE1 RE4 และ RE5



(ก)

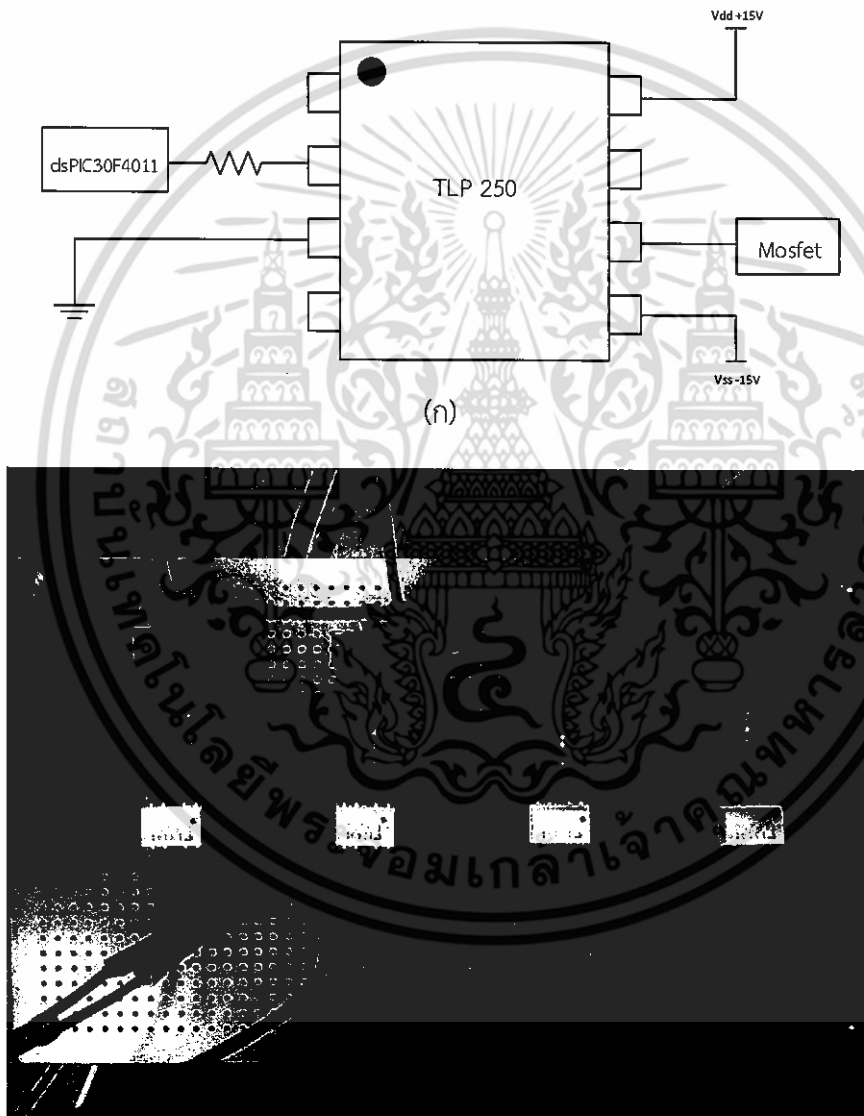


(ข)

เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยบริษัท ไมโครชิพ จำกัด การใช้เอกสารนี้โดยไม่ขออนุญาตจากบริษัท ไมโครชิพ จำกัด อาจทำให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้ ทั้งนี้หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วงจรออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Couplers)

ตัวออปโตอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator) หรือที่เรียกว่าออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto-Coupler) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อทางแสงโดยใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงและเปลี่ยนกลับจากแสงเป็นไฟฟ้าตามเดิม ดังนั้นจึงใช้สัญญาณพีดีบีแอลเอ็ม (PWM) ไปสั่งวงจรออปโตอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสัญญาณชับขาเกตของมอสเฟต แสดงในรูปที่ 3.9



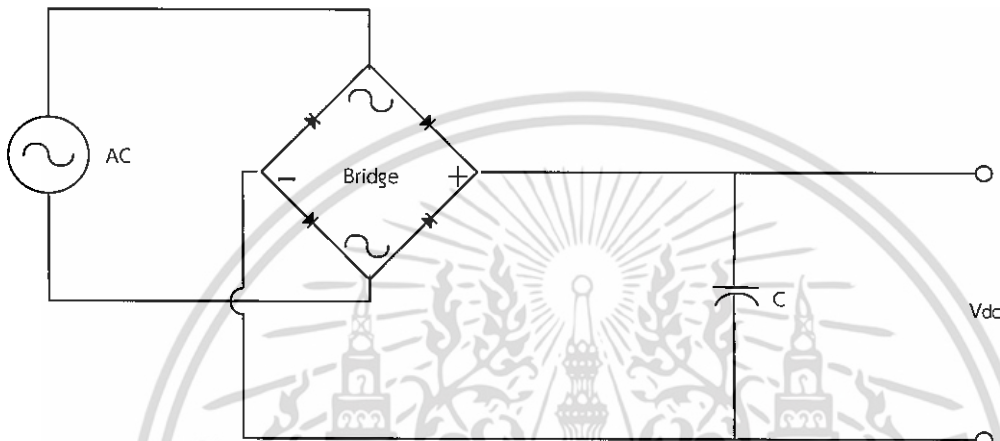
(ก)

รูปที่ 3.9 วงจรออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสประกอบด้วย ปรกติไฟเออร์เต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) ต่อกับตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นวงจรที่ทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตของวงจรนี้ถูกกรองให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการกระเพื่อมน้อยลงโดยใช้ตัวเก็บประจุ แสดงในรูปที่ 3.10



(ก)



(ข)

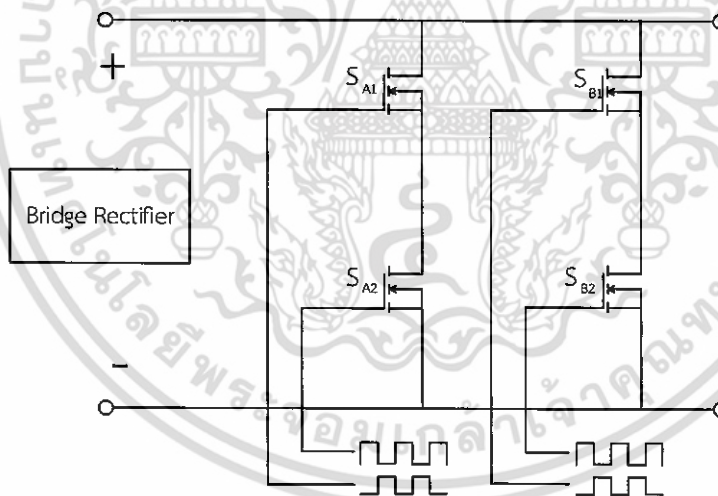
รูปที่ 3.10 วงจรเรียงกระแส (ก) แผงผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge Inverter)

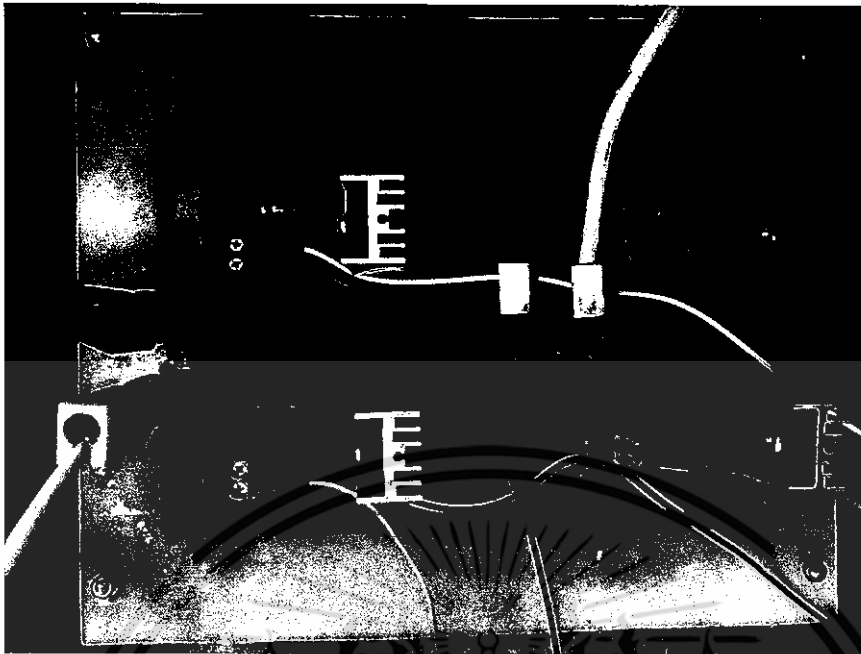
วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปรผันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในการทดลองนี้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวประกอบไปด้วยสองกึ่ง ใช้การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ โดยการสวิตช์ในสองกึ่ง จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือ กิ่ง A ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ขณะที่สวิตช์ในกิ่ง B ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) แรงดันด้านออกที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังลบในครึ่งคาบ ส่วนอีกครึ่งคาบมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์และจากศูนย์ไปยังลบ โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์สองเท่า

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ประกอบด้วยมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัวซึ่งต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) มอสเฟตถูกควบคุมเป็นคู่ โดย S_1 ทำงานพร้อมกับ S_4 และ S_2 ทำงานพร้อมกับ S_3 เปิด-ปิดสลับกันเป็นจังหวะเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ แสดงในรูปที่ 3.11



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

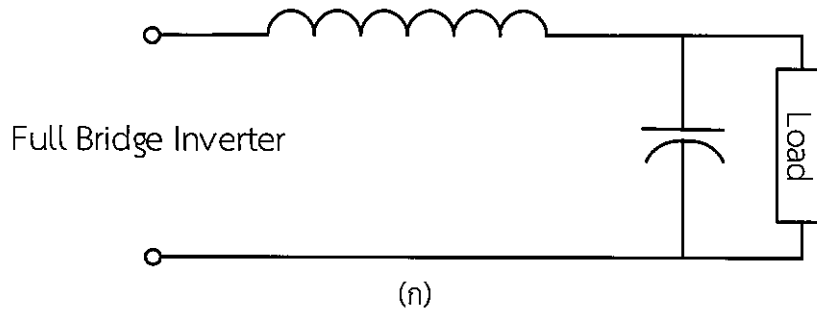
รูปที่ 3.11 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพัลบริดจ์ (ก) แผงผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้ทดลอง

จากรูปที่ 3.11 (ก) แสดงแผงผังของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ส่วนในรูปที่ 3.11 (ข) แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ทำการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีพิกัดอยู่ที่ 80 วัตต์ (w) โดยสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบยูนีโพลาร์ ซึ่งต้องนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) จึงทำให้เป็นสัญญาณไซน์

3.3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีลักษณะการต่อของวงจร คือ ตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมกับวงจร และตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจร คือ ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดผ่านไปได้ ตัวเหนี่ยวนำ (L) มีค่ารีแอกแตนซ์ (X_L) ต่ำ และตัวเก็บประจุ (C) มีค่าอิมพีแดนซ์ (X_C) สูง ทำให้ความถี่ต่ำผ่านตัวเหนี่ยวนำได้สะดวก ระดับสัญญาณเอาต์พุตจึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนดค่ารีแอกแตนซ์มีค่ามากขึ้นและค่าอิมพีแดนซ์ต่ำลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปถูกตัวเก็บประจุดึงลงกราวด์ เพื่อตัดความถี่สูงออกให้เหลือแต่ความถี่มูลฐาน แสดงในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้ทดลอง

โดยสามารถคำนวณหาค่าความถี่ตัดออฟได้ดังสมการ

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (3.10)$$

เมื่อ f_c คือ ความถี่ตัดออฟ

L_f คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

C_f คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุวงจรกรอง

ทำการออกแบบวงจรกรองโดยใช้ค่า $L_f = 25 \text{ mH}$ และ $C_f = 65.7 \text{ } \mu\text{F}$ คำนวณหาค่าความถี่ตัดออฟจากสมการ (3.10) ได้ดังนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{25 \times 10^{-3} \times 65.7 \times 10^{-6}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_c = 124.18 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้น ได้ความถี่คัตออฟเท่ากับ 124.18 Hz

3.3.6 วงจรป้อนกลับแรงดัน

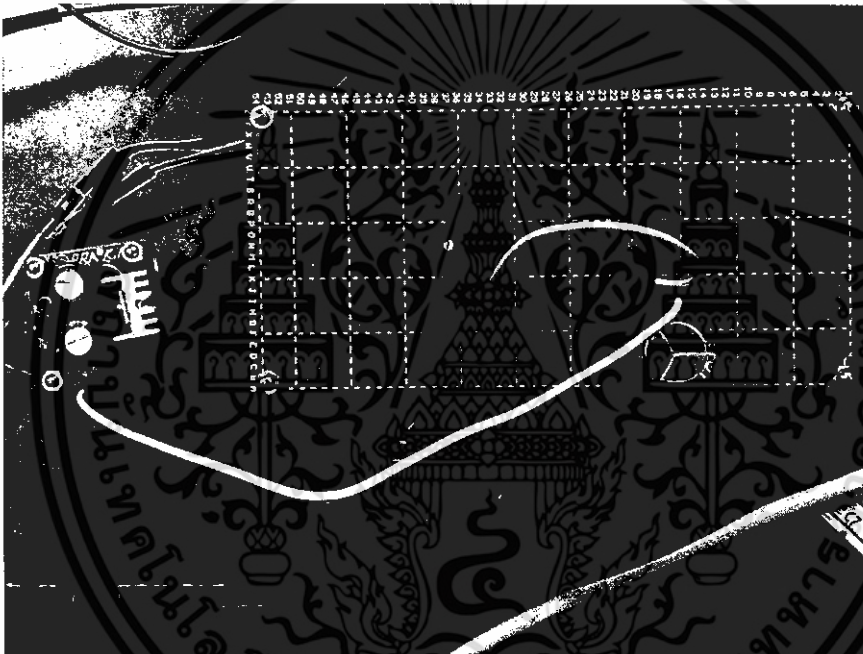
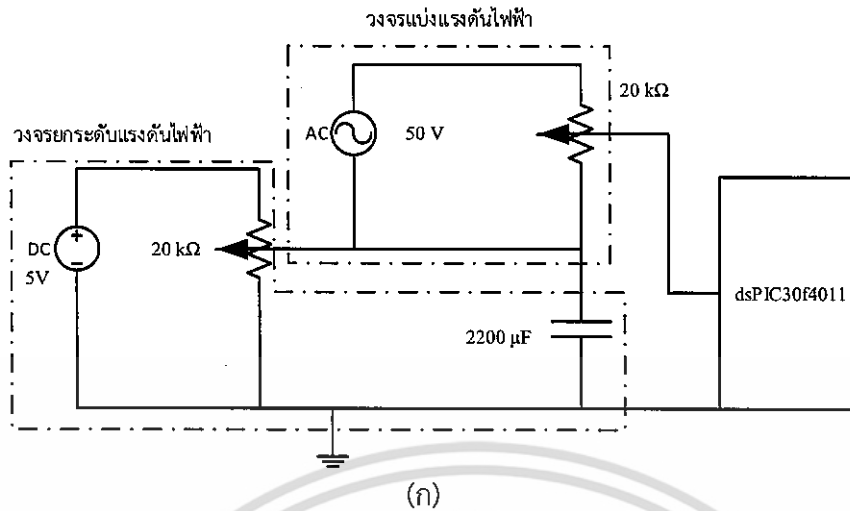
เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ทำการควบคุมแบบป้อนกลับจึงมีการสร้างวงจรป้อนกลับแรงดันสำหรับนำแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง โดยเปรียบเทียบในวงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งใช้ dsPIC30f4011 ซึ่งในวงจรควบคุมสามารถรับแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ (V_{dc}) เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 50 โวลต์ (V_{rms}) จึงต้องสร้างวงจรป้อนกลับแรงดันขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งประกอบด้วยวงจรดังนี้

3.3.6.1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าใช้หลักการของวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม (Series Circuit) เนื่องจากวงจรอนุกรมมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานหรือโหลดไม่ เท่ากัน แต่เมื่อนำแรงดันที่ตกคร่อมโหลดทุกตัวในวงจรมารวมกันซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจร จากหลักการนี้ แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 50 โวลต์ (V_{rms}) แต่แรงดันดังกล่าวมีค่ามากเกินไปซึ่งไม่ต้องการ ต้องการเพียงแค่แรงดันที่อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ (V_{dc}) จึงสามารถใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 20 กิโลโอห์ม ($k\Omega$) มาแบ่งแรงดันจาก 50 โวลต์ (V_{rms}) ให้เหลือเพียง 0.707 โวลต์ (V_{rms}) หรือ 2 โวลต์ (V_{p-p}) แล้วนำแรงดันส่วนนี้ไปต่อกับวงจรรายระดับแรงดัน

3.3.6.2 วงจรรายระดับแรงดัน (Offset Voltage Adjustment Circuit)

วงจรรายระดับแรงดันไฟฟ้าใช้หลักการของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงช่วยยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ (V_{dc}) โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 โวลต์มาแบ่งแรงดันให้เหลือ 2 โวลต์โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้และมีตัวเก็บประจุขนาด 2200 μF เพื่อรักษาระดับแรงดัน นำแรงดันที่ได้ไปต่ออนุกรมกับแรงดันที่ได้จากวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ (V_{dc}) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) สามารถรับได้



รูปที่ 3.13 วงจรย้อนกลับแรงดัน (ก) แผนผังวงจร (ข) วงจรที่ใช้ทดลอง

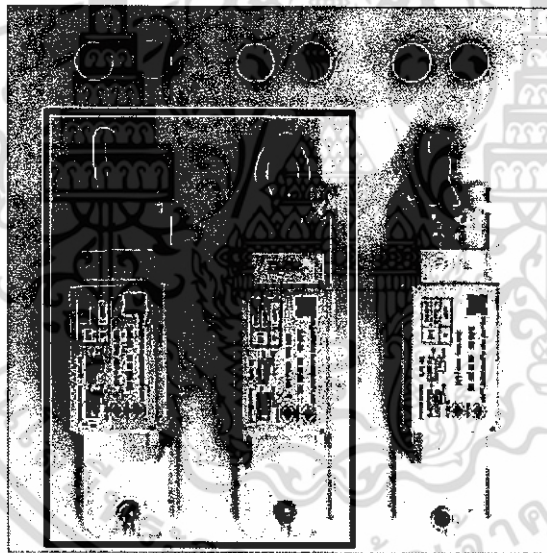
3.3.7 โหลดที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

ในการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ทำการใช้โหลด 2 ชนิด คือ โหลดตัวต้านทาน และโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยโหลดตัวต้านทานเป็นโหลดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอดแสดงในรูปที่ 3.14 ส่วนโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเป็นโหลดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด แล้วนำมาต่ออนุกรมกับบัสลัสต์ 2 ตัวที่ต่อขนานกันแสดงในรูปที่ 3.15 โดยโหลดทั้ง 2 ชนิดนี้นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 โหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 3.15 โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

3.4 สรุปผลการออกแบบ

จากการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนโดยใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีลำดับสูงยากต่อการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ จึงทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม ทำให้ได้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน แต่มีลำดับที่น้อยกว่าทำให้ง่ายต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ส่วนในหัวข้อสุดท้ายเป็นการออกแบบวงจรที่ใช้ในการทำการทดลอง การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ และอธิบายถึงหลักการทำงานของแต่ละวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลอง และผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยมีความถี่สวิตซ์ 25 kHz ทำการทดลองด้วยตัวควบคุมแบบคงทนที่ใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) และตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม แล้วนำตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ ($K_p = 60$ และ $K_i = 200$) ที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler–Nichols method) เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการดูผลตอบสนองเชิงเวลาและตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์โดยการดูค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ได้มีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในระบบที่ใช้ตัวควบคุมตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีการเปลี่ยนแปลงโพลภายในระบบเพื่อทดสอบสมรรถนะความคงทน

การแสดงผลในบทนี้เรียงลำดับดังนี้

หัวข้อ 4.1 แสดงผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

หัวข้อ 4.1.1 แสดงผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล

หัวข้อ 4.1.2 แสดงผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล

หัวข้อ 4.2 แสดงสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่ใช้ในการสร้างแรงดันกระแสสลับทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยมีความถี่สวิตซ์ 25 kHz

หัวข้อ 4.3 แสดงสัญญาณยูนิโพลาร์ที่ได้จากการขับอินเวอร์เตอร์ด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) และแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่โพลเป็นตัวต้านทาน และตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

หัวข้อ 4.4 แสดงผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ 4.4.1 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล ตารางผลตอบแทนของเชิงเวลา และตารางแสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

หัวข้อ 4.4.2 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่โหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล ตารางผลตอบแทนของเชิงเวลา และตารางแสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

หัวข้อ 4.4.3 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

หัวข้อ 4.4.3.1 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล

หัวข้อ 4.4.3.2 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล

หัวข้อ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลอง

หัวข้อ 4.5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

หัวข้อ 4.5.2 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

หัวข้อ 4.6 สรุปผลการจำลอง และผลการทดลอง

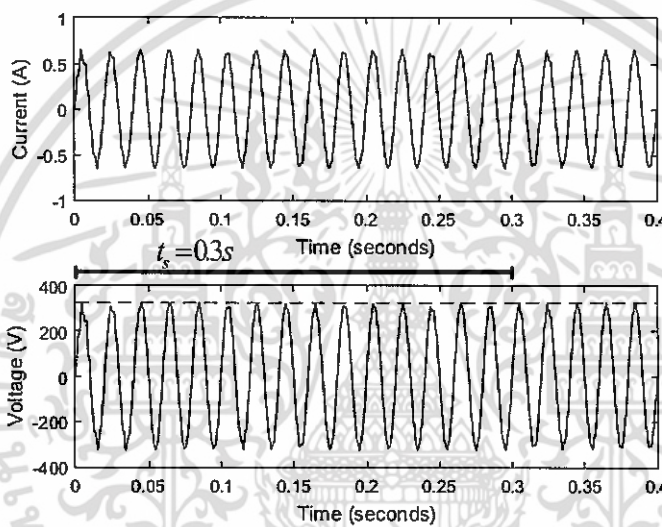
4.1 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

ทำการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ด้วยตัวควบคุมแบบคงทน ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกโคล อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโพลด์เป็นตัวต้านทาน และตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ที่ 220 โวลต์ (V_{rms})

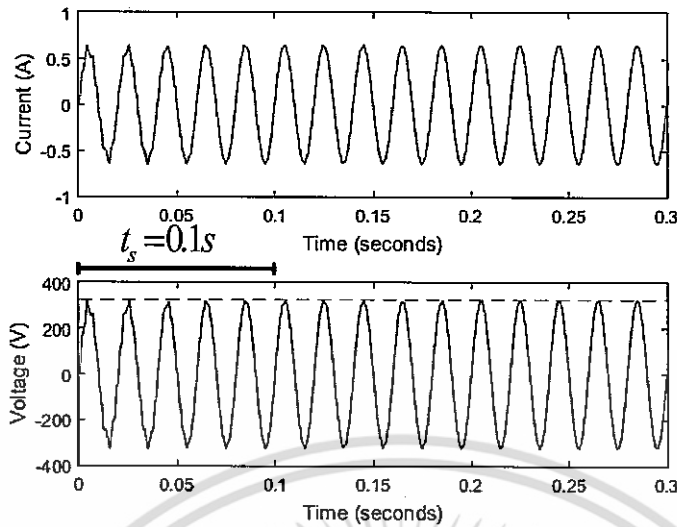
4.1.1 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน

ทำการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยกราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน ทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการดูผลตอบสนองเชิงเวลา ดังนี้



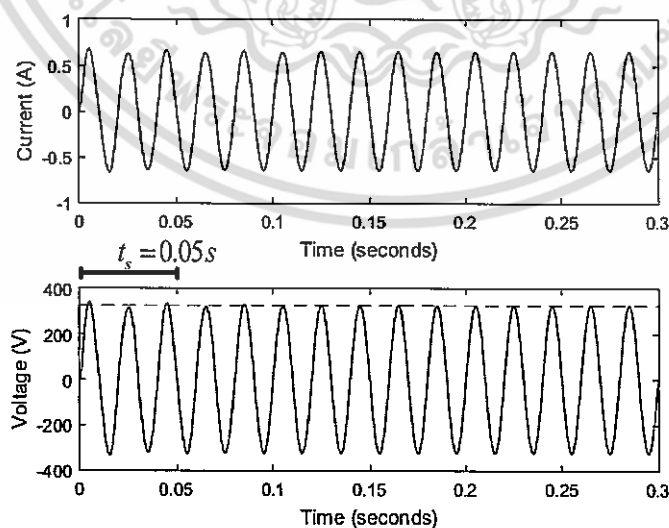
รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล

จากรูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.3 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.1 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



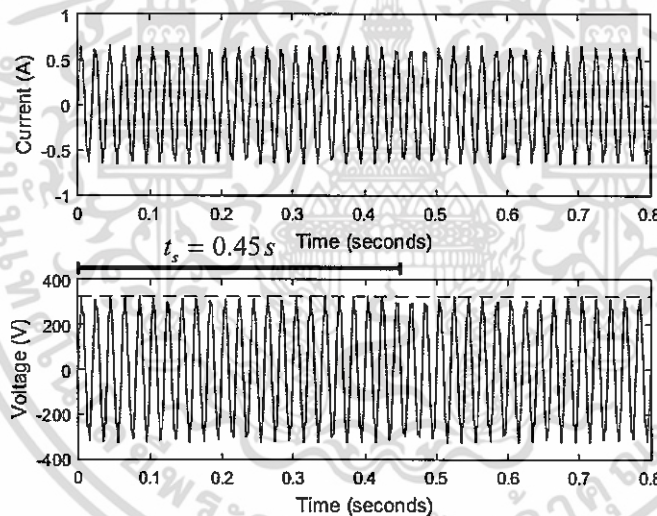
รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้มีการพุ่งเกินประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

4.1.2 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

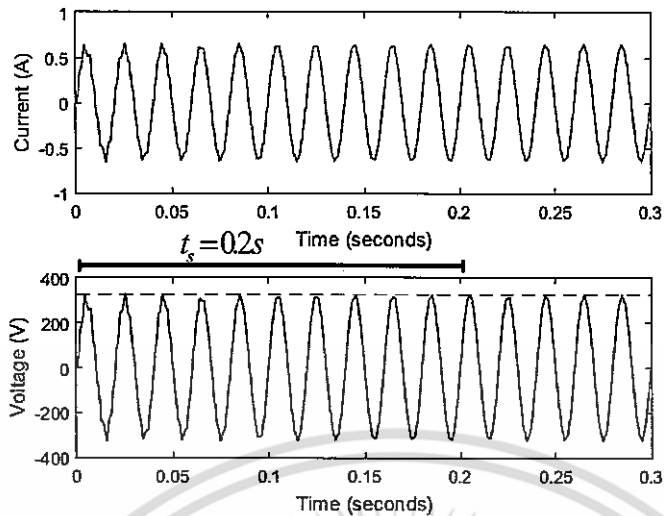
ทำการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยกราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน ทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการดูผลตอบสนองเชิงเวลา ดังนี้



รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล

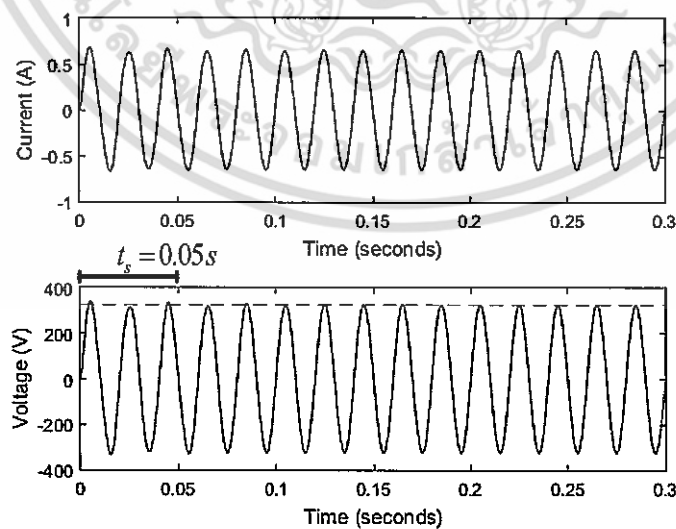
จากรูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอลนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.65 s และค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวมีค่าเท่ากับ 0.9 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถอี่ย้อนกลับที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถอี่ย้อนกลับที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างนำมาคูณผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.2 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



รูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถอี่ย้อนกลับที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน กราฟด้านบนคือกระแส และกราฟด้านล่างคือแรงดัน จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนนำมาคูณผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้มีการพุ่งเกินประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

4.2 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

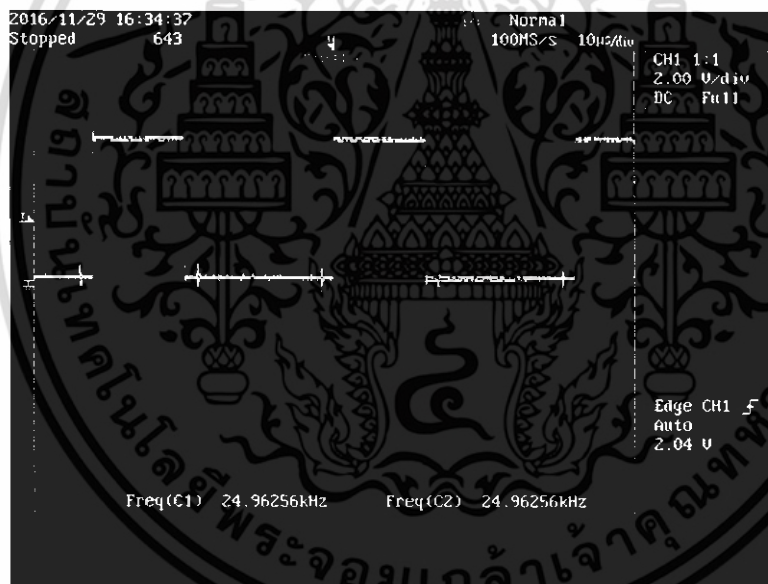
ในวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์ ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) โดยความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม คือ ความถี่สวิตช์

โดยในวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองทำการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) จากวงจรถ่ายควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่ใช้ dsPIC30f4011 โดยใช้การมอดูเลตด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal signal) กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) โดยทำการตั้งค่าความถี่สวิตช์ (f_s) เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โดยการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์แบบปรับเฟส (Shift Phase) โดยมีสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ออกจาก dsPIC30f4011 ทั้งหมด 4 ขา โดยสองขาแรกเกิดจากการมอดูเลตด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบธรรมดา กับรูปคลื่นสามเหลี่ยมและอีกสองขาเกิดจากการมอดูเลตด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ปรับเฟสไป 180 องศา กับรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยมีจุดเด่นของการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของแต่ละเฟส เช่น ความถี่สวิตช์อุปกรณ์เป็น 10 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) หากการทำงานเป็นแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันเอาต์พุตประกอบไปด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกเป็น 2 เท่าของแบบไบโพลาร์ที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ที่โหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทำให้การออกแบบวงจรองความถี่มีขนาดเล็ก ทำได้ง่าย และประหยัด โดยมีสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่ใช้ในการควบคุมวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

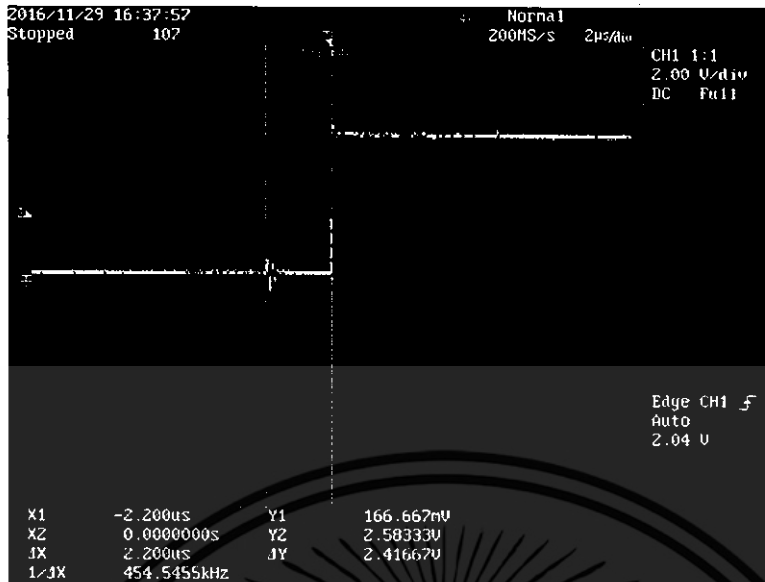


(ก) การมอดูเลตโดยใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบธรรมดา



(ข) การมอดูเลตโดยใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบปรับเฟสไป 180 องศา

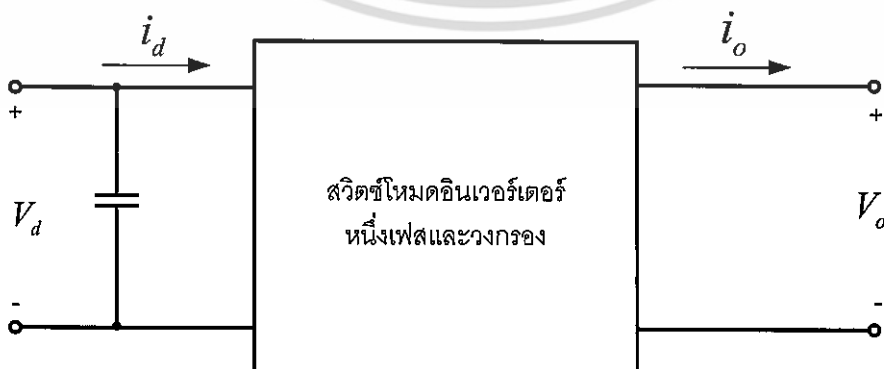
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



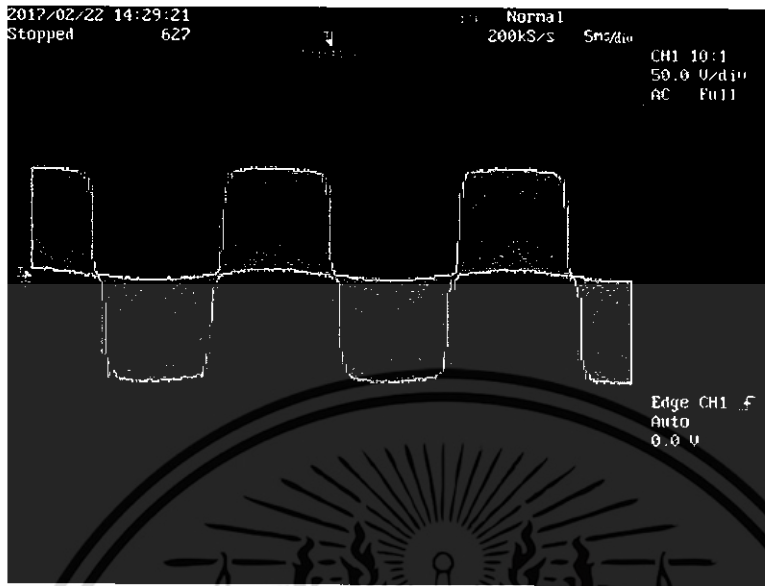
(ค) เดดไทม์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ซึ่งมีค่าเดดไทม์เท่ากับ $2.2 \mu\text{s}$
 รูปที่ 4.7 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่ใช้ในการควบคุมวงจรถูกอินเวอร์เตอร์

4.3 ผลการทดลองจากวงจรถูกอินเวอร์เตอร์

แนวคิดพื้นฐานของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์เป็นการแปรผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแสดงในรูปที่ 4.8 สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ผ่านวงจรถูกความถี่ต่ำผ่านทำให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ ถ้าโหลดเป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าล้าหลังแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (p_o) ถูกพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต โดยวงจรถูกทดลองใช้การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์แบบปรับเฟส (Shift Phase) โดยทำการปรับเฟสไป 180 องศา แสดงดังรูปที่ 4.9

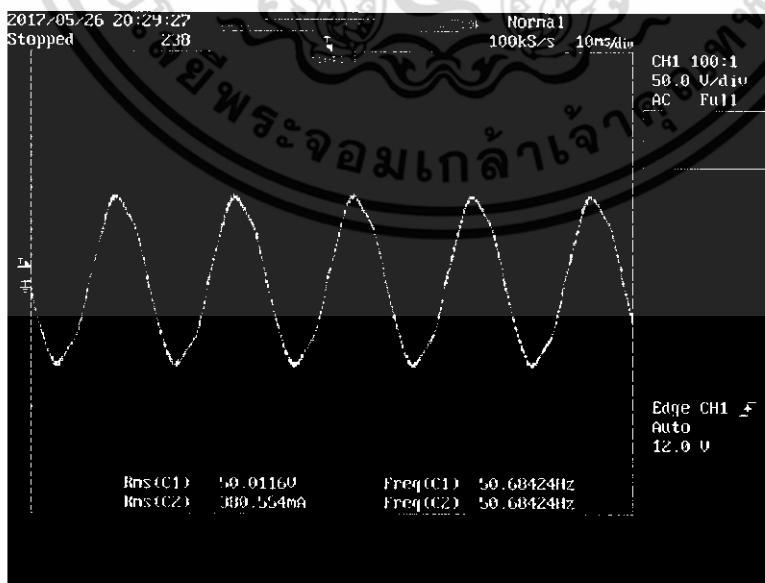


รูปที่ 4.8 แผนภาพของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

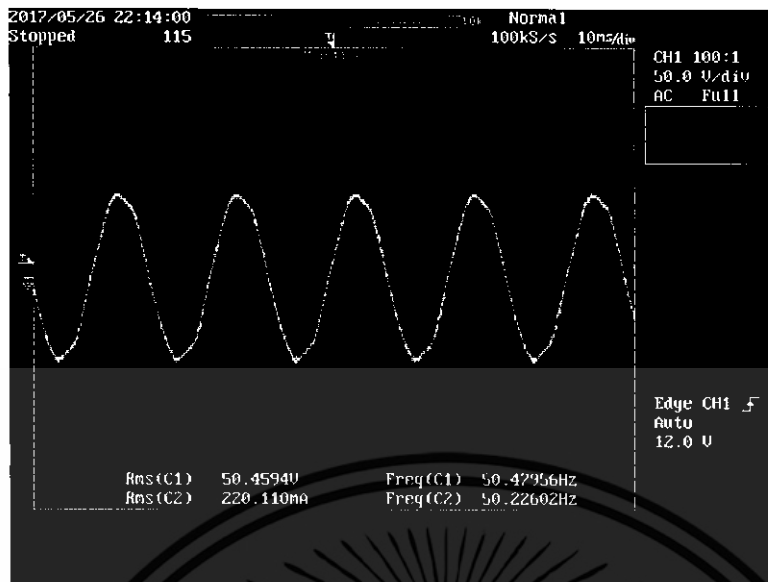


รูปที่ 4.9 การสวิตชิงแบบยูนิโพลาร์แบบปรับเฟส (Shift Phase) ของวงจรอินเวอร์เตอร์

เอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการสวิตชิงแบบยูนิโพลาร์แบบปรับเฟส (Shift Phase) โดยนำเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดังที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ทำให้เอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยมีโหนดเป็นตัวต้านทาน และตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหนดเอกสารนี้เป็น เป็นตัวต้านทานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

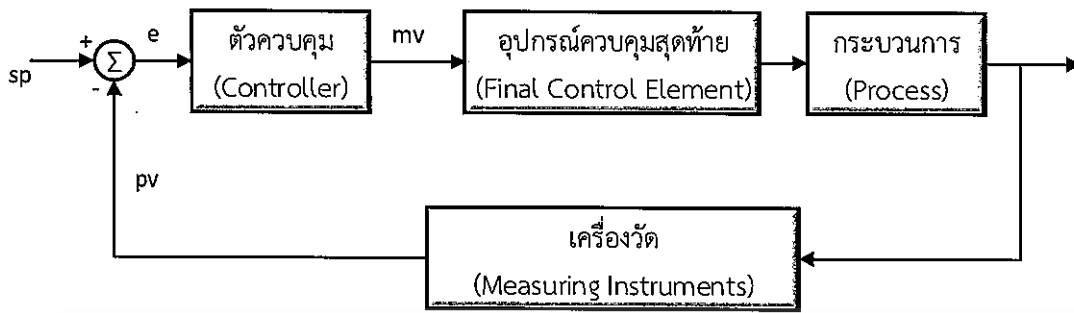


รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.10 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) แสดงเป็นกราฟสี่เหลี่ยม และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) แสดงเป็นกราฟสี่เหลี่ยมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน เห็นได้ว่าแรงดันและกระแสมีเฟสตรงกัน ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) แสดงเป็นกราฟสี่เหลี่ยม และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) แสดงเป็นกราฟสี่เหลี่ยมของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่ากระแสเกิดการล่าช้าหลังจากแรงดันเนื่องจากโหลดมีตัวเหนี่ยวนำ

4.4 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม คือ การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) แรงดัน (pressure) อัตราการไหล (Flow Rate) ค่าความเป็นกรดด่าง (PH) และอื่นๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่ต้องการมากที่สุด แม้ว่าสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบการควบคุมที่เหมาะสม โดยในการทดลองทำการควบคุมระดับของแรงดัน (Voltage) ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับเพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพ (Stability) และมีประสิทธิภาพสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยอุปกรณ์วัดหรือเครื่องมือวัดจะวัดค่าตัวแปรกระบวนการ (pv) เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของของเหลว เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้ คือ แรงดัน (Voltage) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (Setpoint : sp) จากนั้นตัวควบคุมนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error : e) ในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาสัญญาณที่เหมาะสมนำไปควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งเป้าหมายในการทดลอง คือ แรงดันเอาต์พุตขนาด 50 โวลต์ (V_{rms}) เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

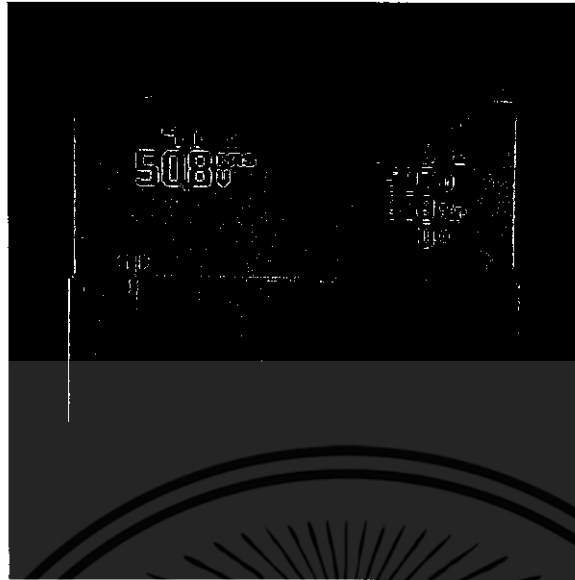
4.4.1 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยโหลดตัวต้านทานคือหลอดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด โดยกราฟสีเหลืองคือแรงดันและกราฟสีเขียวคือกระแส ทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการดูผลตอบสนองเชิงเวลาและตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์โดยการดูค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสักรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



(ก) สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

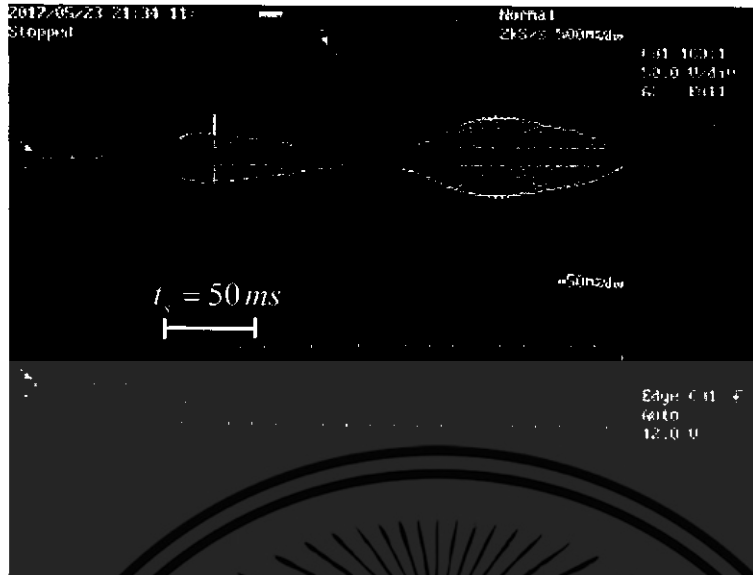


(ข) ค่าความผิดพลาดเฟสฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเฟสฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล

จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน กราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้มีการพุ่งเกินสูงประมาณ 7.07 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 200 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.13 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเฟสฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 4.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.65 Hz และแรงดัน 50.8 โวลต์ (V_{rms})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



(ข) ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรรมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.14 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรรมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่แจ้งชื่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้ง

ควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 50 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.14 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 4.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.08 Hz และแรงดัน 50.5 โวลต์ (V_{rms})



(ก) สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



(ข) ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่

มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 (ก) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโพลด์เป็นตัวต้านทาน กราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน นำมาคูณผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 50 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.15 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 4.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.21 Hz และแรงดัน 50.5 โวลต์ (V_{rms})

ผลตอบสนองเชิงเวลาที่ดูจากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโพลด์เป็นตัวต้านทานนำมาแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสร่วมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน

| ตัวควบคุม | เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (M_p) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (t_s) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (e_{ss}) |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 0 % | 50 ms | 0 % |
| ตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทน | 0 % | 50 ms | 0 % |
| ตัวควบคุมแบบพีไอ | 7.07 % | 200 ms | 0 % |

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมากที่สุด ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวที่เท่ากัน ซึ่งน้อยกว่าผลตอบสนองเชิงเวลาที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยตัวควบคุมแบบพีไอหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล และตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

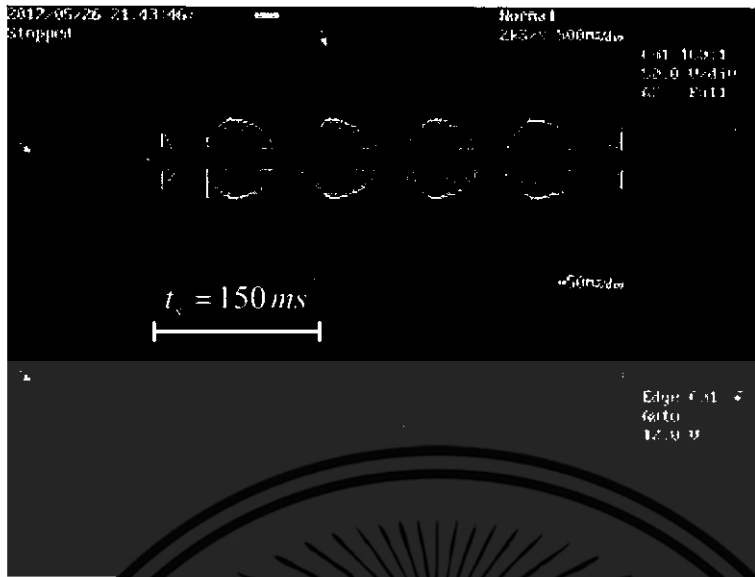
ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

| ตัวควบคุม | ค่าความผิดพลาดกระแสเชิงฮาร์มอนิกสรวม (THD _v) |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 4.3 % |
| ตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทน | 4.3 % |
| ตัวควบคุมแบบพีไอ | 4.7 % |

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน เห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนมีค่าเท่ากัน ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันมากกว่าตัวควบคุมทั้งสองข้างต้น 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวควบคุมแบบพีไอหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล และตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

4.4.2 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน โดยโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำคือหลอดอินแคนเดสเซนต์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด แล้วนำมาต่ออนุกรมกับบัลลาสต์ 2 ตัวที่ต่อขนานกัน โดยกราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันและกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแส ทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการดูผลตอบสนองเชิงเวลาและตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์โดยการดูค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



(ก) สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



(ข) ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.16 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล

จากรูปที่ 4.16 (ก) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิกอล โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล นำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้มีการพุ่งเกินสูงประมาณ 2.83 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 150 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.16 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.65 Hz และแรงดัน 50.8 โวลต์ (V_{rms})



(ก) สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

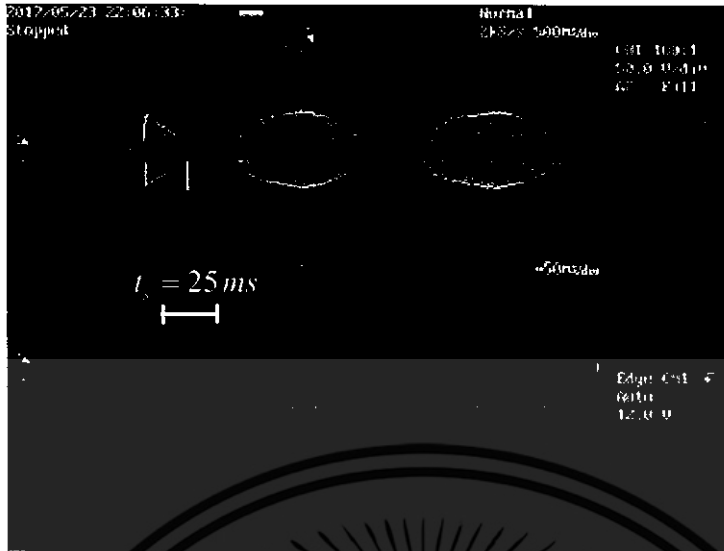


(ข) ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

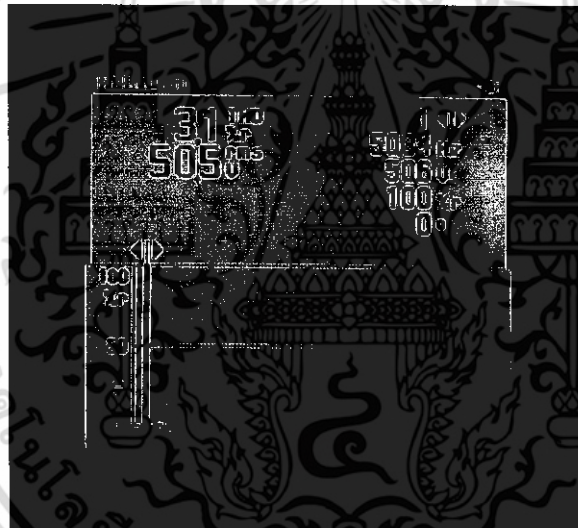
รูปที่ 4.17 สัญญาณเอาต์พุต และค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.17 (ก) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอาต์พุตของระบบนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 25 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.17 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 3.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.26 Hz และแรงดัน 50.8 โวลต์ (V_{rms})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สัญญาณเอ็ดจ์พุตของอินเวอร์เตอร์



(ข) ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันเอ็ดจ์พุตของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.18 สัญญาณเอ็ดจ์พุต และค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวควบคุมแบบคงทน

จากรูปที่ 4.18 (ก) แสดงสัญญาณเอ็ดจ์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมี โหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอ็ดจ์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอ็ดจ์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div จากสัญญาณเอ็ดจ์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนนำมาดูผลตอบสนองเชิงเวลา เห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของเอ็ดจ์พุตของระบบนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 25 ms และสภาวะคงตัวของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนในรูปที่ 4.18 (ข) เป็นรูปจากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 3.1 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 50.34 Hz และแรงดัน 50.5 โวลต์ (V_{rms})

ผลตอบสนองเชิงเวลาที่ได้จากสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำนำมาแสดงในตารางที่ 4.3 ส่วนค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากเครื่องมือวัด (FLUKE 43B) แสดงในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| ตัวควบคุม | เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (M_p) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (t_s) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (e_{ss}) |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 0 % | 25 ms | 0 % |
| ตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทน | 0 % | 25 ms | 0 % |
| ตัวควบคุมแบบพีไอ | 2.83 % | 150 ms | 0 % |

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมากที่สุด ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวที่เท่ากัน ซึ่งน้อยกว่าผลตอบสนองเชิงเวลาที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยตัวควบคุมแบบพีไอหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล และตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

ตารางที่ 4.4 ค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

| ตัวควบคุม | ค่าความผิดพลาดกระแสเชิงฮาร์มอนิกสรวม (THD _v) |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 3.1 % |
| ตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทน | 3.2 % |
| ตัวควบคุมแบบพีไอ | 3.3 % |

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าความผิดพลาดเชิงฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันมากกว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทน 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวควบคุมแบบพีไอหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล และตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนหมายถึงตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง

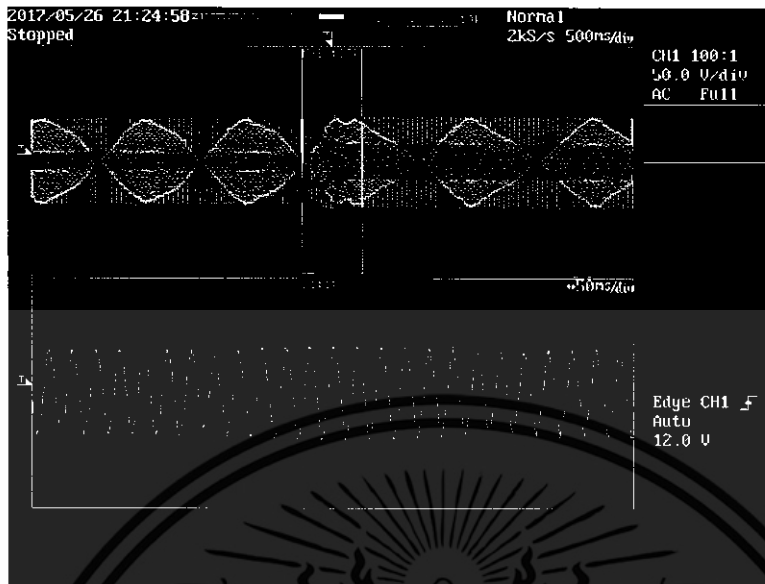
4.4.3 ผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด

ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยมีสองกรณี คือ การเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงโหลดมีดังนี้

4.4.3.1 การเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยการเพิ่มโหลดตัวต้านทานต่อขนานกับโหลดตัวต้านทานชุดแรกในขณะที่อินเวอร์เตอร์กำลังทำงานเมื่อมีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานชุดแรก โดยโหลดตัวต้านทานแต่ละชุดเป็นโหลดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด ในการทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน ได้ผลการทดลองดังนี้

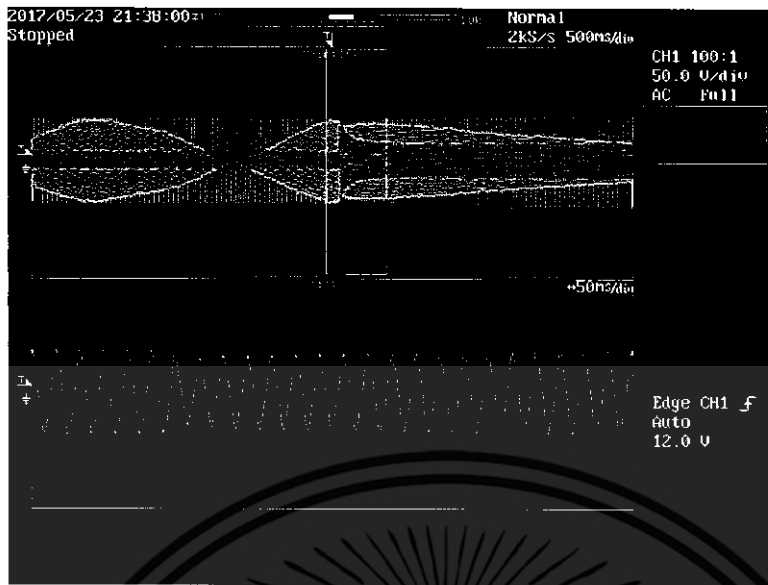
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชกเลอว์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชกเลอว์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน กราฟสี่เหลี่ยมคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสี่เหลี่ยมคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชกเลอว์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีความต้านทานน้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้มีการพุ่งเกินสูงประมาณ 7.07 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 250 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

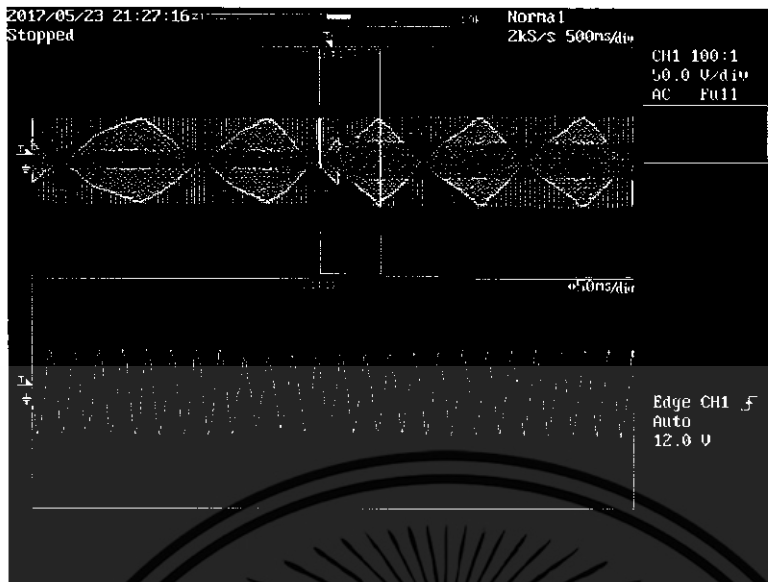
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 4.20 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีความต้านทานน้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 200 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

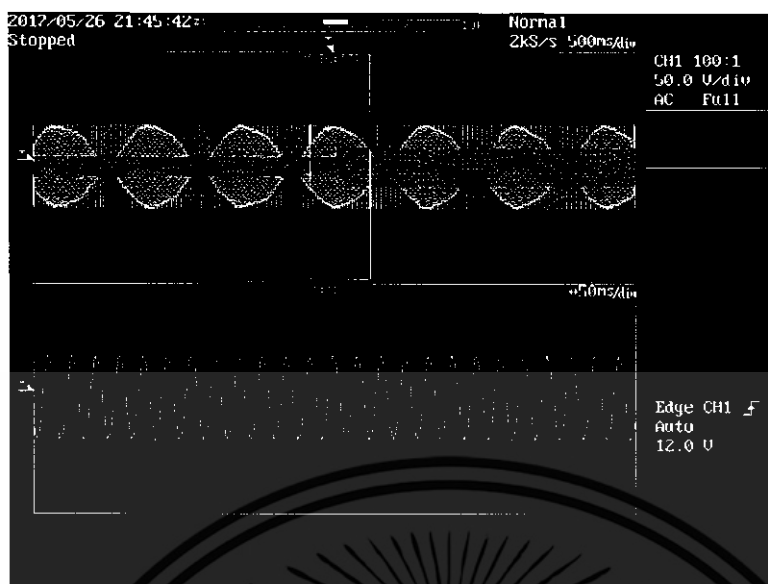


รูปที่ 4.21 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 2 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีค่าความต้านทานน้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 100 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

4.4.3.2 การเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

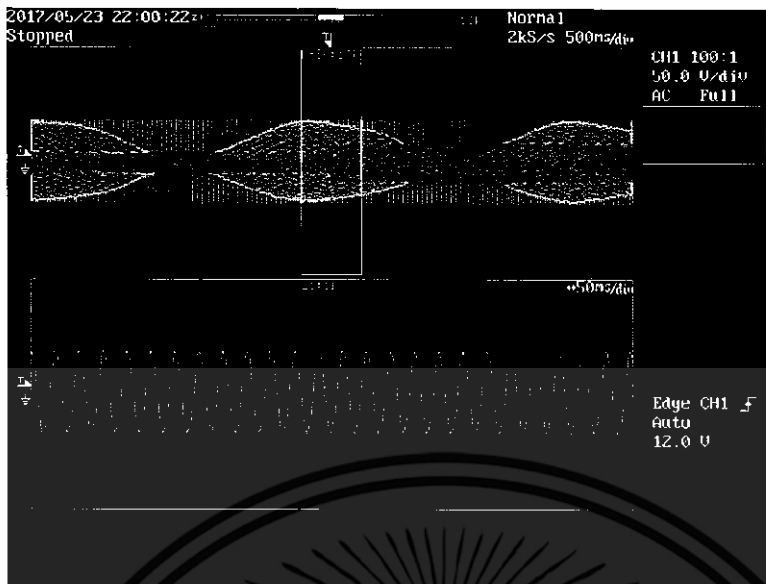
ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยการเพิ่มโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำชุดแรกในขณะที่อินเวอร์เตอร์กำลังทำงานเมื่อมีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำชุดแรก โดยโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำแต่ละชุดเป็นหลอดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด แล้วนำมาต่ออนุกรมกับบัลลาสต์ 2 ตัวที่ต่อขนานกัน ในการทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน ได้ผลการทดลองดังนี้ สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชีกเลอร์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.22 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชีกเลอร์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการชีกเลอร์นิโคลโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 20 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

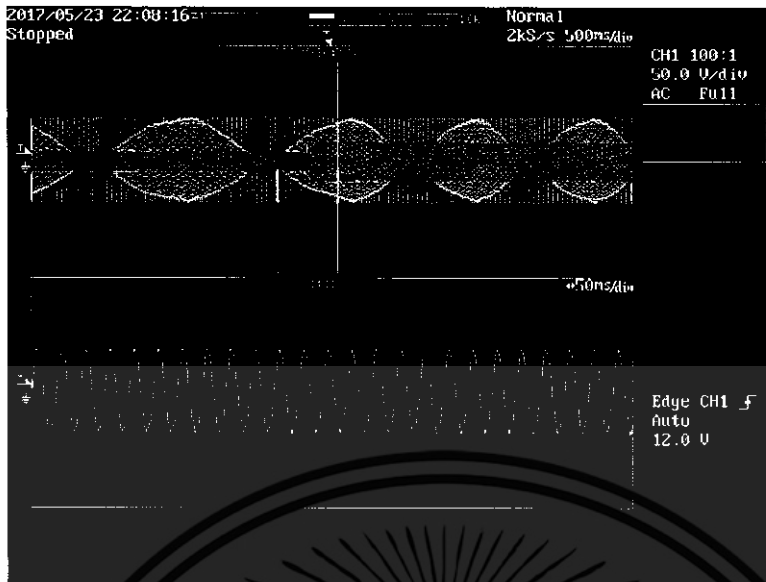
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.23 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้ไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 20 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 สัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ กราฟสีเหลืองคือแรงดันเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของแรงดันไว้ที่ 50 V/div และกราฟสีเขียวคือกระแสเอาต์พุตที่ปรับอัตราส่วนของกระแสไว้ที่ 1 A/div ในกราฟด้านบนแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 500 ms/div และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณโดยปรับอัตราส่วนของเวลาไว้ที่ 50 ms/div ผลตอบสนองเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดให้มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยลง ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมนี้ไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 20 ms และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

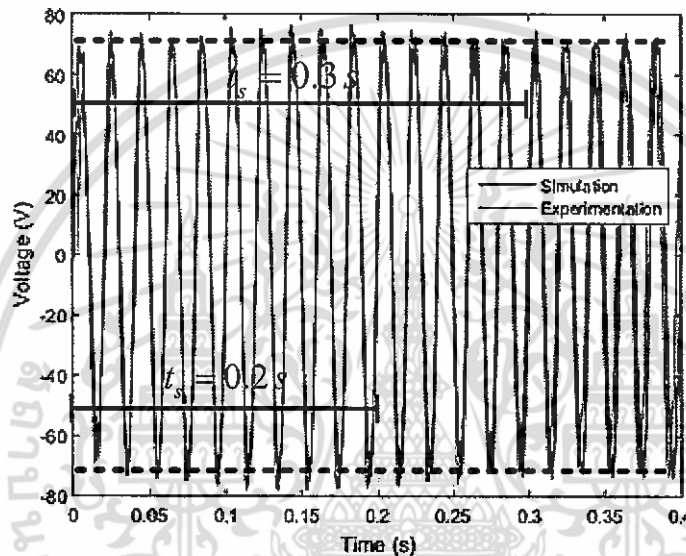
4.5 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลอง

ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน ในการเปรียบเทียบมีโหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 50 โวลต์ (V_{rms}) ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

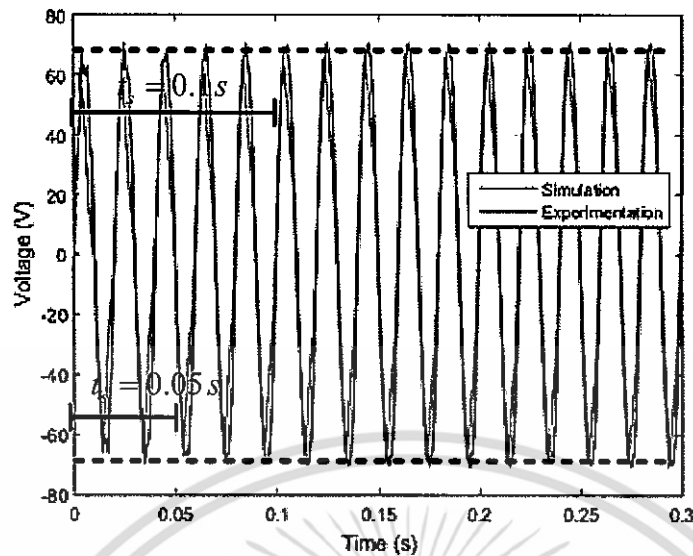
4.5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทนที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยโหลดตัวต้านทานคือหลอดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้



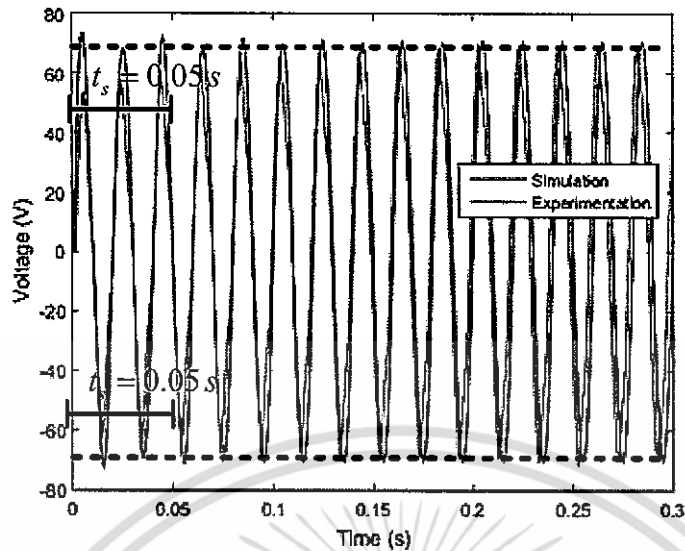
รูปที่ 4.25 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 4.25 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.3 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีความผิดพลาดในสภาวะคงตัวประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการทดลองมีการพุ่งเกินสูงประมาณ 7.07 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.2 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



รูปที่ 4.26 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโพลเป็นตัวด้านทาน

จากรูปที่ 4.26 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างที่มีโพลเป็นตัวด้านทาน โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.1 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



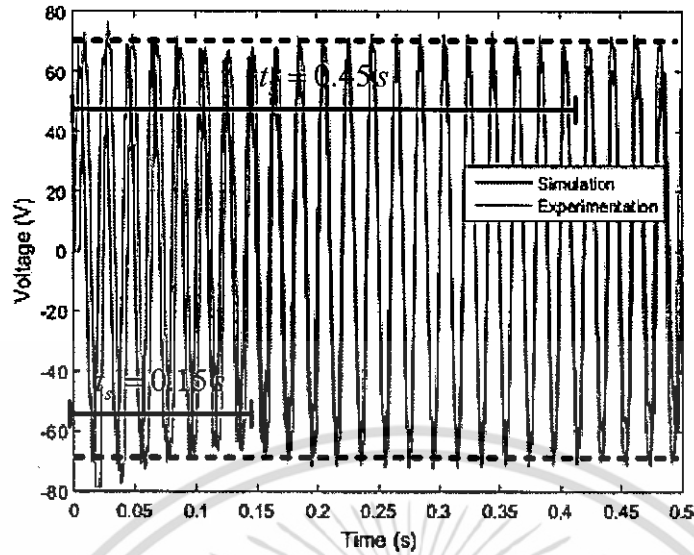
รูปที่ 4.27 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโหนดเป็นตัวด้านทาน

จากรูปที่ 4.27 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนที่มีโหนดเป็นตัวด้านทาน โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองมีการพุ่งเกินสูงประมาณ 4.05 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

4.5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหนดเป็นตัวด้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

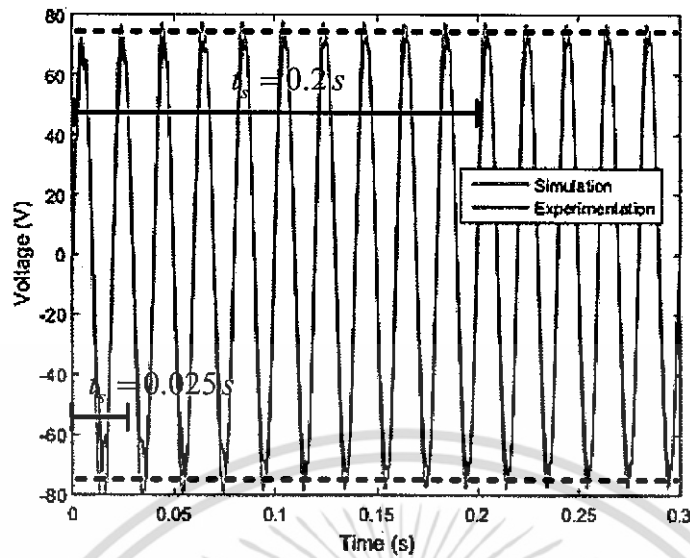
ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทนที่มีโหนดเป็นตัวด้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยโหนดตัวด้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำคือหลอดอินแคนเดสเซนท์ขนาด 100 วัตต์ (w) ต่อขนานกันจำนวน 2 หลอด แล้วนำมาต่ออนุกรมกับบัลลาสต์ 2 ตัวที่ต่อขนานกัน ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



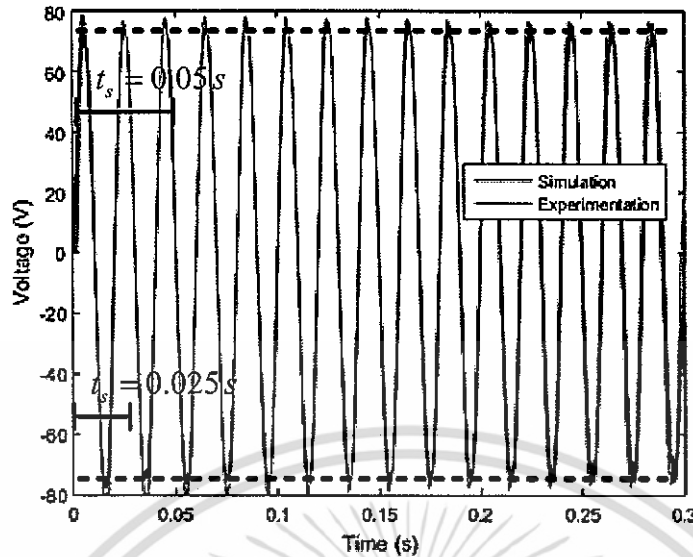
รูปที่ 4.28 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล โดยมีโพลด์เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.28 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลองไม่มีการฟุ้งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.45 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวประมาณ 0.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการทดลองมีการฟุ้งเกินสูงประมาณ 2.83 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.15 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



รูปที่ 4.29 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้าง โดยมีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.29 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างที่มีโพลเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากผลการจำลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.2 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.025 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)



รูปที่ 4.30 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน โดยมีโพลตเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 4.30 แสดงแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนที่มีโพลตเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ โดยกราฟสีน้ำเงินคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลอง ส่วนกราฟสีแดงคือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองมีการพุ่งเกินสูงประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.05 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point) ส่วนแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองไม่มีการพุ่งเกิน ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 0.025 s และสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับจุดทำงาน (Set-Point)

4.6 สรุปผลการจำลอง และผลการทดลอง

จากผลการจำลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 แสดงการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ที่ 220 โวลต์ (V_{rms}) จากผลการทดลองที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 4.2 แสดงสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่ใช้ในการขับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้การสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์ หัวข้อที่ 4.3 แสดงสัญญาณยูนิโพลาร์และสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีโพลตเป็นตัวต้านทานและตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ หัวข้อที่ 4.4 แสดงการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ที่ 50 โวลต์ (V_{rms}) โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้าง และตัวควบคุมแบบคงทน เห็นได้ว่าตัวควบคุมทั้งสามสามารถควบคุมได้แต่มีสมรรถนะที่แตกต่างกันไป ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้างไม่มีการพุ่งเกินและใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้าสู่สภาวะคงตัวใกล้เคียงกันในทุกกรณี แต่ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคลมีการพุ่งเกินและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมากกว่า เมื่อนำตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมาเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะที่ดีกว่าในด้านผลตอบสนองเชิงเวลา ในส่วนของผลการจำลองและผลการทดลองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันบ้างในบางส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบ ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์นี้เป็นสิ่งที่ท้าทายในการออกแบบตัวควบคุม การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบคือการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยมีทั้งโหลดตัวต้านทาน โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และทำการเปลี่ยนแปลงโหลดขณะที่ระบบกำลังทำงาน

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ในการออกแบบตัวควบคุม การสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบคงทนสังเคราะห์ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบและฟังก์ชันน้ำหนักที่เหมาะสม การทดลองจากการใช้ตัวควบคุมแบบคงทนเห็นได้ว่าระบบมีสมรรถนะความคงทนและผลตอบสนองเชิงเวลาที่ดี แต่ตัวควบคุมแบบคงทนมีลำดับสูงยากต่อการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ในงานวิจัยนี้จึงทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการใช้วิธีพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี จากผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดขณะที่ระบบกำลังทำงานเห็นได้ว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างไม่มีการพุ่งเกินและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะความคงทนที่ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน แต่ในด้านการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มากกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนเล็กน้อยในทุกกรณี ดังนั้น สรุปได้ว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนจึงสามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างแทนได้และง่ายในการใช้งานในทางปฏิบัติ

ต่อมาทำการเปรียบเทียบระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างกับระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับจูนค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการซิกเลอร์นิโคล (Ziegler-Nichols method) ซึ่งมีลำดับของตัวควบคุมที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดขณะที่ระบบกำลังทำงานเห็นได้ว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างจะไม่มีการพุ่งเกิน แต่ระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินในกรณีที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานทำให้มีเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มากกว่า เพราะฉะนั้นระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะความคงทนที่ดีกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ในส่วนของการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มากกว่าระบบที่ใช้ตัว

เอ็กสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้างในทุกกรณี และระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินในกรณีที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน แต่ระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้างไม่มีการพุ่งเกินในทุกกรณี ดังนั้น สรุปได้ว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในด้านผลตอบสนองเชิงเวลา

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่น ๆ ได้ แต่ต้องพิจารณาการออกแบบที่สามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ควรเลือกอุปกรณ์ในการสร้างวงจรที่ใช้ในการทดลองให้มีความเหมาะสมกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดกับวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ข. ควรทำการออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองให้มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนส่งผลกระทบต่อวงจรการควบคุม (Microcontroller)

การออกแบบตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ที่กำหนดโครงสร้างให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอ การออกแบบตัวควบคุมสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่น ๆ ได้ แต่ต้องพิจารณาการออกแบบที่สามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ต้องคำนึงถึงการอิ่มตัวของตัวควบคุม (Saturation)

ข. ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการพาทิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (PSO) ต้องทำการกำหนดขอบเขตของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael J. Ryan and Robert D. Lorenz. 1995. "A High Performance Sine Wave Inverter Controller With Capacitor Current Feedback and "Back-EMF" Decoupling." 26th Annual IEEE PESC'95. Vol.1 :507-513.
- [2] Naser M. Abdel-Rahim and John E. Quaicoe. 1996. "Analysis and Design of a Multiple Feedback Loop Control Strategy for Single-Phase Voltage-source UPS Inverter." IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.11, no.4 :532-541.
- [3] Michael J. Ryan, William L. Brumsickle and Robert D. Lorenz. 1996. "Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverter". 26th Annual IEEE PEDES'96. Vol.1 :493-501.
- [4] L. Hongbo, Y. Jun, X. Jian and S. Hongtao, "Single-phase inverter voltage control and parallel circulation current suppression," Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, Wuhan, 2009, pp. 1564-1572.
- [5] Chi-Jen Huang, Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke, "Design of Closed-loop Buck-Boost Converter for Led Driver Circuit", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 1-6, 2011.
- [6] Chieh-Chuan Feng, "A Robust Composite Control for Basic DC-DC Converters", Control Conference (CCC), 4769-4774, Hefei, China, 2012.
- [7] Simone Buso, "Design of a Robust Voltage Controller for a Buck-Boost Converter Using μ -Synthesis", IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 7, No. 2, pp. 222-229, 1999.
- [8] M. Valco, P. Sindler, J. Sedo and J. Kuchta, "Inverter output voltage under different type of loads," ELEKTRO, 2014, Rajecke Teplice, 2014, pp. 383-388.
- [9] S. Yang, Q. Lei, F. Z. Peng and Z. Qian, "A Robust Control Scheme for Grid-Connected Voltage-Source Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 202-212, Jan. 2011.
- [10] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Robust control scheme for a microgrid with PFC capacitor connected," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 5, pp. 1172-1182, Sep./Oct. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] S. A. Emami, M. Bayati Poudeh, and S. Eshtehardiha, "Particle Swarm Optimization for Improved Performance of PID Controller on Buck Converter," 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 06 March 2009.
- [12] Emmanuel Kwaku Anto, Johnson A. Asumadu and Philip Yaw Okyere, "PID Control for Improving P&O-MPPT Performance of a Grid-Connected Solar PV System With Ziegler-Nichols Tuning Method," 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 24 October 2016.
- [13] Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control Analysis and design" Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [14] K. Zhou and J. C. Doyle, "Essential of Robust Control", 1996, Prentice Hall, Upper saddle river, New Jersey.
- [15] Xin-SheYang, " Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications", 2010, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [16] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 9, กรุงเทพฯ: หจก.วี.เจ. พรินตติ้ง , 2552.
- [17] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2554.
- [18] K. Astrom, K. and T.Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", Instrument Society of America, ISBN 1-55617-516-7, 1995




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการ

- [1] สถาปนิก หมดหวัง. วรชาติ สุวรรณงาม. และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล. 2560. "การควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่กำหนดโครงสร้างได้สำหรับอินเวอร์เตอร์." หน้า 332-339 ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
(13th Conference on Energy Network Thailand (E-NETT 13th))

ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

สถาปนิก หมดหวัง วรชาติ สุวรรณงาม และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย "ภาคบรรยาย"

การควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่กำหนดโครงสร้างได้สำหรับอินเวอร์เตอร์

ระหว่างวันที่ 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน พ.ศ. 2560

HI (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มีฤทธิ์ คุณัญญา)
ประธานคณะกรรมการจัดงาน

MM (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจาเนียร อัครราช)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมคงทนแบบพีไอดีที่กำหนดโครงสร้างได้สำหรับอินเวอร์เตอร์ Fixed-Structure Robust PID Control for Inverter

สถาปนิก หมดหวัง*, วราชาติ สุวรรณงาม และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เลขที่ 1 ซอยอโศกกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520
 *ผู้ติดต่อ: ssathapanic@gmail.com, 087-039-4933

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยใช้การควบคุมแบบคงทน (Robust control) อาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ได้จะมีลำดับสูงซึ่งสามารถนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ยากจึงต้องทำการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี การหาลำดับประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วิธีการหาพิเคิลสวอมออปติไมเซชัน (PSO) ที่ทำให้สมรรถนะของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกสรรมของแต่ละระบบได้ถูกตรวจสอบ และผลของตัวควบคุมแบบพีไอดียังคงมีความคงทนและมีคุณภาพของรูปคลื่นที่ดีโดยแสดงในค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกสรรมของกระแส (THD)

คำหลัก: อินเวอร์เตอร์, การควบคุมแบบคงทน, การควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้

Abstract

This paper presents the inverter control system by regulating the output voltage of the inverter while load varying. In this work, the H Infinity mixed-sensitivity technique was utilized to design the robust control. As the results indicated, the synthesized controller is still in high order, which is difficult to practically implement. In addition, in several applications, the structure of controller is needed to be rearranged into the PID structure. To solve this problem, in the proposed technique, the Particle Swarm Optimization (PSO) is used to find the PID parameters which the evolved PID controller has the nearly same robust performance as the original robust controller. Total harmonic distortion of each system were investigated and the results show that the PID controller has simple structure and still retains the robustness and good waveform quality especially in the THD.

Keywords: Inverter, Robust control, H infinity control

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้การควบคุมอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งใน ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ นอกจากนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตที่ทันสมัยในโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยนำการควบคุมอัตโนมัติมาใช้กับระบบไฟฟ้า โดยอินเวอร์เตอร์ที่นำไปใช้งานเป็นวงจรที่เป็นการแปรผันจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทนได้ อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่ผลิตพลังงานออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อเด่นในการใช้งานที่แคบ จึงต้องทำการเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งทำ

ให้มีข้อเด่นและความเหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้นโดยใช้อินเวอร์เตอร์แปลงพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม ด้านเกษตรกรรม ด้านบริการและอื่นๆ ดังนั้นการควบคุมอินเวอร์เตอร์จะต้องมีประสิทธิภาพสูง [1-3] โดยทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีเทคนิคจำนวนมากที่ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม อาทิเช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี [4] การควบคุมแบบการวิเคราะห์ห้วงรอบปิด [5] ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้นไม่ได้กล่าวถึงการรับประกันเสถียรภาพ ระบบควบคุมที่ถูกสนใจนำมาใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ คือ ระบบควบคุมแบบคงทนซึ่งมีผู้วิจัยไว้จำนวนมาก [6,7] โดยทั่วไปในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนจะ

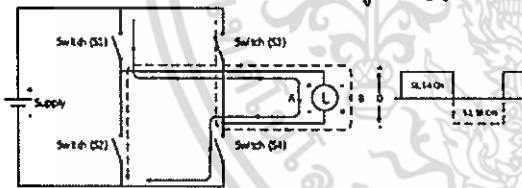
เริ่มทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ใน [8] ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อที่จะนำไปใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับภายใต้ชนิดของโหลดที่แตกต่างกัน

ในบทความนี้ทำการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) [9,10] ใน [9,10] ได้ตัวควบคุมที่มีอันดับสูงยากต่อการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ จึงได้ทำการกำหนดโครงสร้างให้เป็นตัวควบคุมแบบพีโอทีโดยการใช้วิธีการพาทิเคิลสวอมมอปติมิเซชัน (PSO) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมเพื่อให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคงทน (ใน [11] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ PSO เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของตัวควบคุมพีโอทีโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแต่ไม่ได้คำนึงถึงความคงทน)

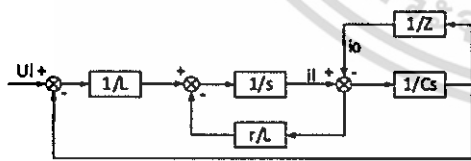
2. โมเดลอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสและเทคนิคการออกแบบ

2.1 โมเดลอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

งานวิจัยนี้ทำการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 1 โดยทำการควบคุมแรงดันต้นเอาต์พุตให้มีขนาดคงที่ขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ทำการควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีระบบเชิงเส้น โดยพลวัตของอินเวอร์เตอร์คือตัวกรอง LC และโหลด จึงทำการสมมติว่าความถี่สวิตซ์ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอที่จะสามารถละเลยพลวัตดังกล่าวได้ ทำให้ได้แผนภาพโมเดลของระบบวงเปิดของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสได้ดังรูปที่ 2 [8]



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 แผนภาพโมเดลของระบบวงเปิดของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

โดยแผนภาพในรูปที่ 2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{Z}{ZCLs^2 + (L+rZC)s + (r+Z)} \quad (1)$$

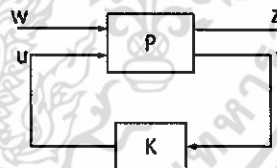
$L = 25\text{ mH}$
 $C = 65.7\text{ }\mu\text{F}$

$r = 0$

โดยที่ L,C และ r คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำของตัวกรอง ค่าของตัวเก็บประจุของตัวกรองและค่าของตัวต้านทานของตัวกรอง เราสามารถละเลยค่าตัวต้านทาน (r) ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ได้เนื่องจากมีขนาดเล็กพอ จึงสามารถให้ r=0 ได้ [8] และ Z คืออิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งนำฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบนี้ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

2.2 การควบคุมแบบคงทน

การจัดการกับปัญหาของเสถียรภาพที่เกิดจากความไม่แน่นอนของโหลดในอินเวอร์เตอร์ งานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้ ในการหาตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้จะมีการสร้างกรอบการออกแบบทั่วไปสำหรับการออกแบบแสดงในรูปที่ 3 โดย P คือพลานต์ของระบบ (generalized plant) และ K คือตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบ ในส่วนอินพุตของ P ประกอบด้วย u คือตัวแปรควบคุม (control variable) ที่กำเนิดโดยตัวควบคุมและ w คืออินพุตภายนอก (exogenous inputs) ที่รวมสัญญาณคำสั่งและสัญญาณรบกวนที่จุดต่างๆ ของระบบ ส่วนทางด้านเอาต์พุตประกอบด้วย z เรียกว่าเอาต์พุตสมรรถนะ (performance outputs) หรือเอาต์พุตค่าแตกต่าง (error outputs) ซึ่งอาจจะไม่ได้มีการติดตั้งตัวตรวจจับเพื่อวัดค่าจริงในทางปฏิบัติ ส่วน y คือเอาต์พุตจากการวัด (measurement outputs) เป็นเอาต์พุตที่มีการวัดจริงและเป็นค่าที่ป้อนให้กับตัวควบคุม [12,13]



รูปที่ 3 กรอบการออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่

ทำการควบคุมระบบด้วยการควบคุมเอชอินฟินิตี้แบบความไวผสม (mixed-sensitivity) เป็นชื่อที่ตั้งให้กับปัญหาการจลนศาสตร์วงรอบฟังก์ชันถ่ายโอน โดยที่ฟังก์ชันความไว $S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}$ ถูกจัดรูปร่วมกับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตัวอื่น เช่น $K(s)S(s)$ หรือฟังก์ชันเติมเต็มความไว $T(s) = I - S(s)$ เห็นได้ว่าฟังก์ชัน $S(s)$ และ $T(s)$ เป็นตัวสำคัญของการควบคุมหากต้องการผลตอบแทนของระบบให้ เป็นไปตามที่ต้องการ เมื่อต้องการให้เอาต์พุตของระบบตามรอยคำสั่งอย่างสมบูรณ์ต้องพยายามทำให้ $S(s)$ เข้าสู่ศูนย์ ในขณะที่เดียวกันไม่ต้องการสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัด (noise) มีผลกระทบต่อเอาต์พุตจึงต้องพยายามทำให้ $T(s)$ เข้าสู่ศูนย์เช่นกัน แต่จากนิยามของ $S(s)$ และ $T(s)$ จะได้ว่า

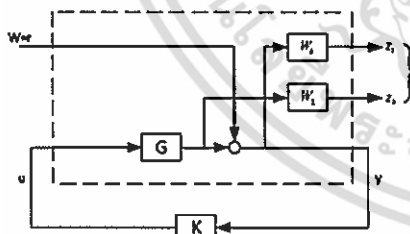
$$S(s) + T(s) = 1 \quad (2)$$

สมการนี้เรียกว่า เงื่อนไขบังคับทางพีชคณิต (algebraic constraint) จากสมการที่ (2) ไม่สามารถทำให้ $S(s)$ และ $T(s)$ มีค่าน้อยพร้อมกันได้ มีวิธีหลีกเลี่ยงโดยต้องทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองมีค่าน้อยที่ความถี่ต่างกัน โดยให้ $|S(j\omega)|$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ของสัญญาณค่าอ้างอิง (reference) และสัญญาณรบกวน (disturbance) ขณะที่ให้ $|T(j\omega)|$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่สูง เพราะเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากการวัด (noise) มากที่สุด

การควบคุมเอชอินทิเกรตแบบความไวผสม (mixed-sensitivity) จะใช้ในรูปแบบของปัญหาความไวผสม S/T ดังรูปที่ 4 โดยมีวัตถุประสงค์คือการสังเคราะห์ตัวควบคุมที่มีสมรรถนะเพื่อให้อัตราขยายเอชอินทิเกรตจาก w ถึง z มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ดังนี้

$$\|T_w\|_{\infty} < 1 \text{ หรือ } \left\| \frac{W_1 S}{W_2 T} \right\|_{\infty} < 1 \quad (3)$$

โดยปกติแล้วการรบกวน (disturbance) เป็นสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ จึงสามารถถูกกำจัดได้โดยทำให้ค่าเอกฐานสูงสุดของ $S(s)$ มีค่าน้อยในย่านความถี่ต่ำ ทำให้ได้โดยการเลือกตัวกรองความถี่ต่ำผ่านคือ $W_1(s)$ ที่มีแบนวิธเท่ากับสัญญาณรบกวน (disturbance) และทำการจัดรูปฟังก์ชันเพิ่มเติมความไว $T(s)$ เพื่อการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด (noise) และความทนทานด้านเสถียรภาพต่อความไม่แน่นอนเชิงผลคูณที่เอาต์พุตของพลาเน็ตโดยการเลือกฟังก์ชันน้ำหนัก $W_2(s)$

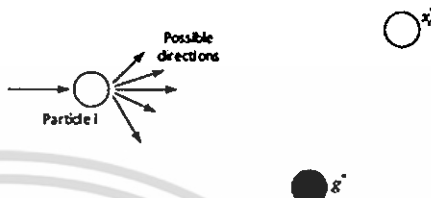


รูปที่ 4 ปัญหาความไวผสม S/T

2.3 ทาที่เคลสวอมออปติไมเซชัน (PSO)

วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบพาทิเคลสวอมออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization) หรือเรียกว่า PSO เป็นวิธีการหาค่าตอบแบบสุ่มประเภทหนึ่งโดยมีเส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคดังรูปที่ 5 ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในเชิงวิศวกรรมอย่างหลากหลาย โดยในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดเป็นการหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ให้มีค่าที่ดีที่สุดซึ่งอาจหมายถึงค่าที่มากที่สุดหรือ

น้อยที่สุดตามแต่วัตถุประสงค์ของปัญหา ในส่วนของงานวิจัยนี้ นำการหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบ PSO มาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คเพื่อการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุม ทำให้สามารถนำตัวควบคุมมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ง่ายยิ่งขึ้น [15]



รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน PSO
รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการหาค่าตอบที่ดีที่สุด โดยที่ x_i' คือค่าตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคในขณะนั้น ส่วน g' คือค่าตอบที่ดีที่สุดของทุกอนุภาคในขณะนั้น

วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบ PSO อนุภาคแต่ละตัวมีการปรับความเร็วใหม่ตามสมการที่ (4) และทำการปรับตำแหน่งของอนุภาคใหม่ด้วยสมการที่ (5)

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \alpha \epsilon_1 \cdot [g' - x_i^t] + \beta \epsilon_2 \cdot [x_i^t - x_i^t] \quad (4)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (5)$$

โดยที่ x_i และ v_i คือเวกเตอร์ของตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค i ตามลำดับ ϵ_1 และ ϵ_2 คือเวกเตอร์ที่เกิดจากการสุ่มโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 α และ β คือค่าคงที่ความเร่ง โดยตัวแปรเริ่มต้นของอนุภาคควรกระจายอย่างเป็นรูปแบบและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคสามารถให้มีค่าเท่ากับ 0 ได้ ($v_i^{t=0} = 0$) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานของ PSO ดังแผนภาพในรูปที่ 6

3. การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์

การจัดการกับปัญหาของเสถียรภาพที่เกิดจากความไม่แน่นอนของโหลดในวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ตัวควบคุมเอชอินทิเกรตแบบความไวผสม (mixed-sensitivity) [9,10] โดยจุดมุ่งหมายของการออกแบบคือต้องการสมรรถนะการติดตามคำสั่งที่ติและรักษาเสถียรภาพของระบบในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลดที่มีค่าอยู่ในช่วงที่ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็นดังนี้

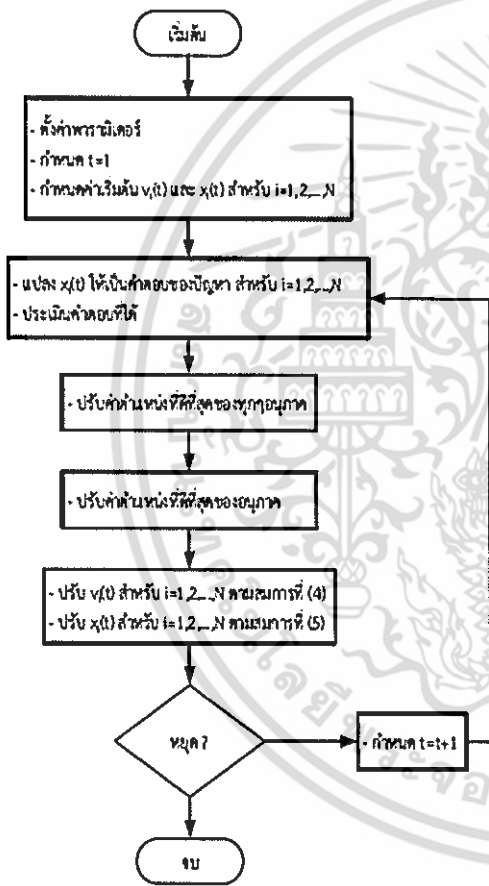
$$G_o(s) = \frac{Z}{ZCLs^2 + (L+rZC)s + (r+Z)} \quad (6)$$

ทำการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเท่ากับ 100-1,000 Ω ($Z = 100-1,000 \Omega$) เห็นได้ว่าการ

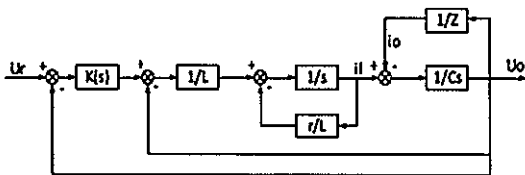
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบตัวควบคุมไม่สนใจโพลที่มีตัวเหนี่ยวนำ (L) เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำไม่ส่งผลต่อระบบ

ในรูปที่ 7 เป็นแผนภาพการควบคุมแบบคงทน ซึ่ง $K(s)$ เป็นตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบ การควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้ที่มีฟังก์ชันนำหน้ามาตรฐานแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นวิธีความไวผสม (mixed-sensitivity) โดยมีวัตถุประสงค์คือการสังเคราะห์ตัวควบคุม $K(s)$ เพื่อให้อัตราขยายจาก w ถึง z มีค่าน้อยกว่าหนึ่งตามสมการที่ (3) โดยการเลือกฟังก์ชันนำหน้า W_1 และ W_2 อย่างเหมาะสม



รูปที่ 6 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของ PSO



รูปที่ 7 แผนภาพการควบคุมแบบคงทน

3.1 การเลือกฟังก์ชันนำหน้าสำหรับสมรรถนะในการตามรอยคำสั่งและสมรรถนะในการจัดการรบกวน

สมรรถนะในการตามรอยคำสั่งและสมรรถนะในการจัดการรบกวนที่ดีต้องทำให้ฟังก์ชันความไว $S(s)$ มีอัตราขยายต่ำในย่านความถี่ต่ำ โดยฟังก์ชันนำหน้า W_1 ทำหน้าที่เป็นแม่พิมพ์ในการหล่อขึ้นรูปของ $S(s)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$|S(j\omega)| < \frac{1}{|W_1(j\omega)|}, \forall \omega \quad (7)$$

ดังนั้น ในการเลือกฟังก์ชันนำหน้า W_1 จึงต้องเลือกให้มีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ต่ำในขณะที่ทำให้อัตราขยายต่ำในย่านความถี่สูงด้วยวิธีการสุ่มค่าแล้วดูผลตอบสนอง ทำให้ได้ฟังก์ชันนำหน้า W_1 ที่ถูกเลือกใช้เป็นดังนี้

$$W_1 = \frac{1}{0.001s + 0.001} \quad (8)$$

3.2 การเลือกฟังก์ชันนำหน้าสำหรับสมรรถนะความคงทน

การจัดรูปฟังก์ชันเดิมเพิ่มความไว $T(s)$ เป็นประโยชน์สำหรับการจัดสัญญาณรบกวนจากการวัดและความทนทานด้านเสถียรภาพต่อความไม่แน่นอนเชิงผลคูณที่เอาต์พุตของพลานต์ โดยความไม่แน่นอนเชิงผลคูณสามารถหาได้จากสมการดังนี้

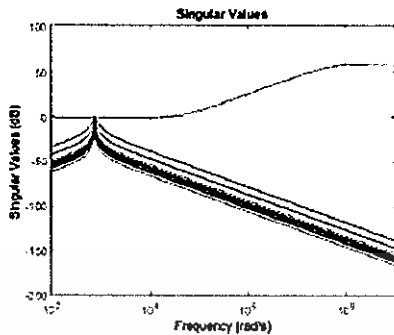
$$\Delta(s) = \sigma \left(\frac{G_u - G_{av}}{G_{av}} \right) \quad (9)$$

โดยที่ G_u คือโมเดลจริงของพลานต์ และ G_{av} คือโมเดลโมโนลิธของพลานต์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังนี้

$$G_{av}(s) = \frac{Z_N}{Z_N C L s^2 + (L + r Z_N C) s + (r + Z_N)} \quad (10)$$

โดยที่ Z_N คืออิมพีแดนซ์ของโพลที่มีค่าเท่ากับ 500 Ω ดังนั้นทำการเลือกฟังก์ชันนำหน้า W_2 ด้วยวิธีการสุ่มค่าแล้วดูผลตอบสนองจากกรณีที่ย่ำที่สุดของความไม่แน่นอนเชิงผลคูณ โดยให้ฟังก์ชันนำหน้า W_2 อยู่เหนือกรณีที่ย่ำที่สุดแสดงในรูปที่ 8 (กรณีที่ย่ำที่สุด คือ กราฟสี่เหลี่ยมที่มีค่าเอกฐานสูงสุด) เพื่อให้บรรลุสมรรถนะความคงทนที่ต้องการต้องทำให้ $\|W_2 T\|_{\infty} < 1$ ทำให้ได้ฟังก์ชันนำหน้า W_2 เป็นดังนี้

$$W_2 = \frac{1 \times 10^{-4} s + 4.5}{1 \times 10^{-7} s + 5} \quad (11)$$



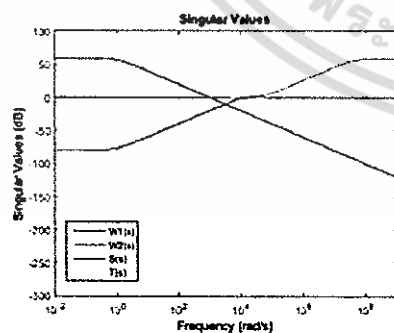
รูปที่ 8 ค่าเอกฐานของ $\Delta(s)$ และฟังก์ชันนำหนัก W_1

3.3 การสังเคราะห์ตัวควบคุมเอชอินฟินิตีแบบความไวผสม (mixed-sensitivity)

หลังจากเลือกฟังก์ชันนำหนักที่จำเป็นในการออกแบบตัวควบคุมแบบความไวผสม (mixed-sensitivity) อย่างเหมาะสมแล้ว สามารถใช้โปรแกรมแมทแลบในการสังเคราะห์ตัวควบคุม $K(s)$ โดยการใช้ฟังก์ชัน mixsyn กับการกำหนด G_{xy} , W_1 และ W_2 ผลของตัวควบคุมที่ได้เป็นดังนี้

$$K(s) = \frac{9.485 \times 10^7 s^3 + 4.743 \times 10^{15} s^2 + 1.444 \times 10^{17} s + 2.887 \times 10^{21}}{s^4 + 5.015 \times 10^7 s^3 + 7.419 \times 10^{12} s^2 + 3.081 \times 10^{17} s + 3.052 \times 10^{21}} \quad (12)$$

โดยตัวควบคุม $K(s)$ ตัวนี้ทำให้ได้ค่าของ $\|T_{wz}\|_\infty = 0.9061$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ระบบนี้มีสมรรถนะความคงทนและแสดงค่าเอกฐานของ $S(s)$, $T(s)$, $W_1(s)$ และ $W_2(s)$ ในรูปที่ 9 โดย $S(s)$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่ต่ำทำให้ระบบมีสมรรถนะในการตามรอยคำสั่งและสมรรถนะในการจัดการรบกวนที่ต่ำและ $T(s)$ มีขนาดเล็กในย่านความถี่สูงทำให้ระบบมีสมรรถนะความคงทนและสมรรถนะในการจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดที่ต่ำ



รูปที่ 9 ค่าเอกฐานของ $S(s)$, $T(s)$, $W_1(s)$ และ $W_2(s)$

ต่อมาทำการกำหนดโครงสร้างตัวควบคุม $K(s)$ ไปเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยมีโครงสร้างตามสมการที่ (13) ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมที่ไอดีด้วยวิธีการหาทีเลสวอมออบติไมเซชัน (PSO) โดยใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 100 อนุภาค ค่าคงที่ความเร่งเท่ากับ 2 และขอบเขตของค่า K_p , K_i และ K_d เท่ากับ $0-1 \times 10^6$ เพื่อให้มีค่า $\|T_{wz}\|_\infty < 1$ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนตัวควบคุมแบบคงทนและมีกราฟแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ทำให้ค่าของ $\|T_{wz}\|_\infty$ ลดเข้าสู่ค่าที่น้อยที่สุดในรูปที่ 10 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

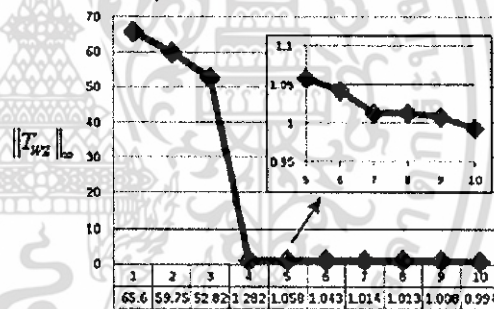
$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (13)$$

$$K_p = 363.5783$$

$$K_i = 4.6446 \times 10^3$$

$$K_d = 0.0780$$

ซึ่งตัวควบคุมที่ไอดี $K_{PID}(s)$ นี้จะทำให้ได้ค่า $\|T_{wz}\|_\infty = 0.9938$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ระบบนี้มีสมรรถนะความคงทนเหมือนกับตัวควบคุมที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเอชอินฟินิตี



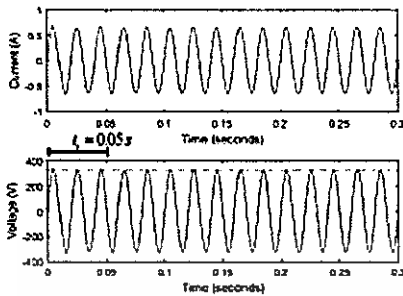
รูปที่ 10 กราฟแสดงการหาค่าที่ดีที่สุดแบบ PSO

4. การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

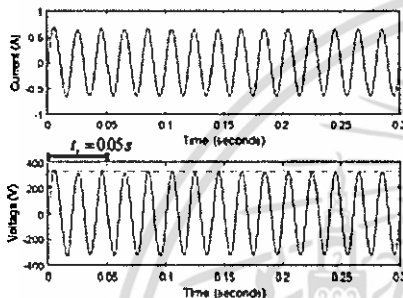
สมรรถนะของตัวควบคุมที่สังเคราะห์มาได้ถูกนำไปตรวจสอบด้วยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ โดยทำการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

4.1 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

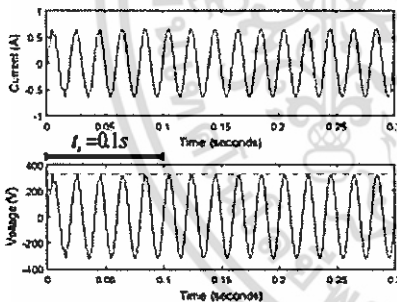
ทำการจำลองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยมีความถี่สวิตซ์ซึ่ง 25 kHz โดยทำการจำลองด้วยตัวควบคุมที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเอชอินฟินิตีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้จากการกำหนดโครงสร้างโดยหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการหาทีเลสวอมออบติไมเซชัน (PSO) เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม ซึ่งมีผลการจำลองแสดงในรูปที่ 11-12



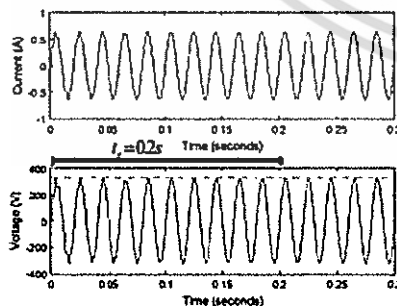
(ก) โหลดตัวต้านทาน



(ข) โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ
รูปที่ 11 แรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัว
ควบคุมแบบคงทนที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเอชอินฟินิตี



(ก) โหลดตัวต้านทาน



(ข) โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ
รูปที่ 12 แรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัว
ควบคุมแบบพีโอทีที่ได้จากการกำหนดโครงสร้าง

รูปที่ 11 - 12 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยกราฟด้านบนเป็นกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกราฟด้านล่างเป็นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดย (ก) แสดงผลของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω ส่วน (ข) แสดงผลของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 5 mH และแสดงผลตอบสนองเชิงเวลาและค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกโดยรวมแสดงในตารางที่ 1 - 4

ตารางที่ 1 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω

| ตัวควบคุม | เปอร์เซ็นต์การหุงเกิน (M_r) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (t_r) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (e_{ss}) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 4.5 % | 0.05 s | 0 % |
| ตัวควบคุมพีโอทีแบบคงทน | 0 % | 0.1 s | 0 % |

ตารางที่ 2 ผลตอบสนองเชิงเวลาของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 5 mH

| ตัวควบคุม | เปอร์เซ็นต์การหุงเกิน (M_r) | เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (t_r) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (e_{ss}) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 4.5 % | 0.05 s | 0 % |
| ตัวควบคุมพีโอทีแบบคงทน | 0 % | 0.2 s | 0 % |

ตารางที่ 3 ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรวมของกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω

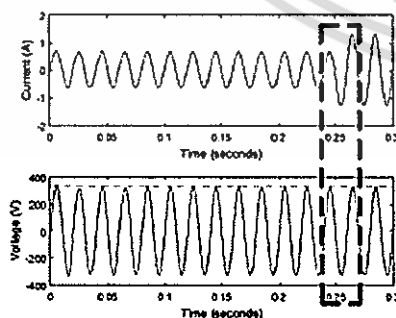
| ตัวควบคุม | ค่าความผิดเพี้ยนกระแสเชิงฮาร์มอนิกสรวม (THD,) |
|-------------------------|-----------------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 0.07 % |
| ตัวควบคุมที่โอทีแบบคงทน | 0.54 % |

ตารางที่ 4 ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสรวมของกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการต่อโหลดด้วยตัวต้านทานขนาด 500 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 5 mH

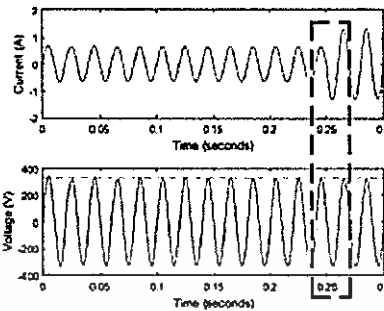
| ตัวควบคุม | ค่าความผิดเพี้ยนกระแสเชิงฮาร์มอนิกสรวม (THD,) |
|-------------------------|-----------------------------------------------|
| ตัวควบคุมแบบคงทน | 0.06 % |
| ตัวควบคุมที่โอทีแบบคงทน | 1.16 % |

จากตารางที่ 1-4 เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมแบบที่โอทีที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะใกล้เคียงกันจึงสามารถนำตัวควบคุมแบบที่โอทีไปใช้แทนได้เนื่องจากตัวควบคุมแบบที่โอทีนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ง่ายกว่า

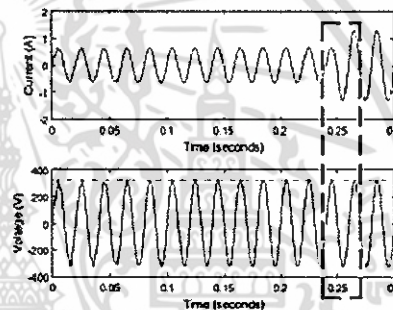
ต่อมาทำการรบกวนระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบเดิม แสดงดังรูปที่ 14 - 15



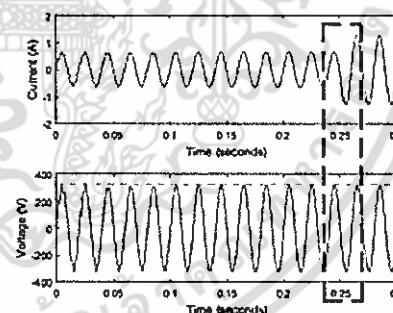
(ก) โหลดตัวต้านทาน



(ข) โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำรูปที่ 14 แรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เวลา 0.25 วินาที ที่ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเอชอินฟินิตี



(ก) โหลดตัวต้านทาน



(ข) โหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำรูปที่ 15 แรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เวลา 0.25 วินาที ที่ใช้ตัวควบคุมแบบที่โอทีที่ได้จากการกำหนดโครงสร้าง

รูปที่ 14 - 15 แสดงแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยกราฟด้านบนเป็นกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกราฟด้านล่างเป็นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดย (ก) แสดงผลของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยในช่วงเวลาแรกโหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 500 Ω และมีมีการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยการต่อโหลดชุด

เดิมขนานไปกับตัวต้านทานตัวแรก ส่วน (ข) แสดงผลของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยในช่วงเวลาแรก โหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 500 Ω ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 5 mH และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยการต่อโหลดชุดเดิมขนานไปกับโหลดตัวแรก เห็นได้ว่าเมื่อมีการรบกวนระบบ ตัวควบคุมแบบฟuzzyที่มีการกำหนดโครงสร้างยังสามารถควบคุมระบบให้อัตทุกของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าระบบควบคุมมีความคงทน

5. สรุป

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของโหลดเป็นสิ่งที่ท้าทายในการออกแบบตัวควบคุม โดยงานวิจัยนี้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบเฮอซิวิตีแบบความไวผสม (mixed-sensitivity) ในการออกแบบตัวควบคุมและทำการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมแบบคงทนให้เป็นตัวควบคุมแบบฟuzzyโดยการใช้วิธีหาฟิตเนสของอนุกรมเซลล์ (PSO) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบฟuzzy โดยสมรรถนะของตัวควบคุมแบบคงทนและตัวควบคุมแบบฟuzzyที่มีการกำหนดโครงสร้างมีสมรรถนะใกล้เคียงกันจึงสามารถใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyแทนได้และง่ายในการใช้งานในทางปฏิบัติ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF045409

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Michael J.Ryan and Robert D. Lorenz. 1995. "A High Performance Sine Wave Inverter Controller With Capacitor Current Feedback and "Back-EMF" Decoupling." 26th Annual IEEE PESC'95. Vol.1 :507-513.

[2] Naser M. Abdel-Rahim and John E. Quaicoe. 1996. "Analysis and Design of a Multiple Feedback Loop Control Strategy for Single-Phase Voltage-source UPS Inverter." IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.11, no.4 :532-541.

[3] Michael J.Ryan, William L. Brumsickle and Robert D. Lorenz. 1996. "Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverter". 26th Annual IEEE PEDES'96. Vol.1 :493-501.

[4] L. Hongbo, Y. Jun, X. Jian and S. Hongtao, "Single-phase inverter voltage control and parallel circulation current suppression," Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, Wuhan, 2009, pp. 1564-1572.

[5] Chi-Jen Huang, Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke, "Design of Closed-loop Buck-Boost Converter for Led Driver Circuit", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 1-6, 2011.

[6] Chieh-Chuan Feng, "A Robust Composite Control for Basic DC-DC Converters", Control Conference (CCC), 4769-4774, Hefei, China, 2012.

[7] Simone Buso, "Design of a Robust Voltage Controller for a Buck-Boost Converter Using μ -Synthesis", IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 7, No. 2, pp. 222-229, 1999.

[8] M. Valco, P. Sindler, J. Sedo and J. Kuchta, "Inverter output voltage under different type of loads," ELEKTRO, 2014, Rajecke Teplice, 2014, pp. 383-388.

[9] S. Yang, Q. Lei, F. Z. Peng and Z. Qian, "A Robust Control Scheme for Grid-Connected Voltage-Source Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 202-212, Jan. 2011.

[10] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Robust control scheme for a microgrid with PFC capacitor connected," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 5, pp. 1172-1182, Sep./Oct. 2007.

[11] S. A. Emami, M. Bayati Poudeh, and S. Eshtehardiha, "Particle Swarm Optimization for Improved Performance of PID Controller on Buck Converter," 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 06 March 2009.

[12] Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control Analysis and design" Second Edition, John Wiley & Sons, New York.

[13] K. Zhou and J. C. Doyle, "Essential of Robust Control", 1996, Prentice Hall, Upper saddle river, New Jersey.

[14] Xin-SheYang, "Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications", 2010, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสถาปนิก หมัดหวัง
วัน เดือน ปีเกิด 23 พฤศจิกายน 2535
ที่อยู่ 1/10 หมู่ 8 แขวงคูฝั่งเหนือ เขตหนองจอก กทม. 10530
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2558
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน พ.ศ.2560 - ปัจจุบัน
ตำแหน่งวิศวกร บริษัท ฟอสเตอร์ เอ็นจิเนียริง จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้