ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำแบบสวิตช์ตัวเดียวสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าพิสัยกว้าง

LOW POWER DC/DC SINGLE – SWITCH CASCADED FLYBACK CONVERTER FOR WIDE INPUT RANGE

ภัสสร เครือน้ำคำ
PASSORN KHRUANAMKHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-080-036

ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำแบบสวิตช์ตัวเดียวสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าพิสัยกว้าง

LOW POWER DC/DC SINGLE – SWITCH CASCADED FLYBACK CONVERTER FOR WIDE INPUT RANGE

ภัสสร เครือน้ำคำ
PASSORN KHRUANAMKHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-080-036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW POWER DC/DC SINGLE – SWITCH CASCADED FLYBACK CONVERTER FOR WIDE INPUT RANGE

PASSORN KHRUANAMKHAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-080-036

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำแบบสวิตช์ตัวเดียวสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าพิสัยกว้าง

Thesis Title Low Power DC/DC Single-Switch Cascaded Flyback Converter for Wide Input Range

นักศึกษา นางสาวภัสสร เครือน้ำคำ

รหัสประจำตัว 55611352

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.นพดล มณีรัตน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-080-036

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชนินทร์	บุญลักษณานุสรณ์	
ผศ.ดร.นนทวัฒน์	จุลเดชะ	
ผศ.ดร.พูลศักดิ์	โกษิยาภรณ์	
ผศ.ดร.ดอน	อิศรากร	
ผศ.ดร.นพดล	มณีรัตน์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำแบบสวิตช์ตัวเดียวสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าพิสัยกว้าง
นักศึกษา	นางสาวภัสสร เครือน้ำคำ
รหัสประจำตัว	55611352
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.นพดล มณีรัตน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำแบบสวิตช์เดียวที่มีพิสัยของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ากว้างตั้งแต่ 20 - 120V แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก 18V (3W) ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode, DCM) ระบบควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เป็นระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก (Analog Feedback Control System) การหาแบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์ (Averaged Switch Model) เพื่อนำไปออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อก (Analog Compensator Circuit) ในระบบควบคุมด้วยเทคนิค K – Factor ผลการทดลองดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่สร้างขึ้นได้ผลการทำงานตามต้องการ โดยมีผลการทดลองที่สภาวะคงตัว (Steady – State Response) ได้ค่าไลน์เรกกูเลชัน (Line Regulation) สูงสุดไม่เกิน 0.61% และค่าโหลดเรกกูเลชัน (Load Regulation) สูงสุดไม่เกิน 3.62% ผลการทดลองที่สภาวะพลวัต (Dynamic Response) ระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทันทีใดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดได้รวดเร็ว ผลการทดลองวัดประสิทธิภาพที่แต่ละเงื่อนไขการทำงานมีค่าตั้งแต่ 30 – 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Low Power DC/DC Single – Switch Cascaded Flyback Converter for Wide Input Range
Student	Ms.Passorn Khruanamkham
Student ID.	55611352
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Noppadol Maneerat

ABSTRACT

This thesis presents the design of wide input range DC-DC power supply using single-switch cascaded flyback converter with input voltage between 20 – 120V which generates 18V output voltage and low output power (3W) in discontinuous current mode (DCM). The control system of converter is the analog feedback control system. Converter model is designed by using the averaged switch modeling technique. The analog compensator circuit is designed by using K – Factor technique. The experimental results of steady - state response show that the maximum line regulator is not over than 0.61% and the maximum load regulator is not over than 3.62%. The experimental result of dynamic response shows that the control system responses immediately to the electricity load change. The performance measurement results of each operating conditions ranged are 30 - 70%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. นพดล มณีรัตน์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ ตลอดจนชี้แนะแนวทางให้ปฏิบัติที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา นักวิจัยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการควบคุมการแปลงรูปกำลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Control Lab) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ พร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการทั้งที่จบไปแล้วก็ดียังไม่จบก็ดี ที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนในด้านการศึกษาและให้กำลังใจ จนกระทั่งบรรลุในสิ่งที่มุ่งหวังไว้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภัสสร เครือน้ำคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..II
กิตติกรรมประกาศ..III
สารบัญ..IV
สารบัญตาราง..VI
สารบัญรูป..VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์..X
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..3
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..3
1.4 ขอบเขตการวิจัย..5
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา..5
บทที่ 2 ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว..6
2.1 บทนำ..6
2.2 ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..6
2.2.1 หลักการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..6
2.2.2 การออกแบบส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..13
2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..16
2.3.1 แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..21
2.3.2 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง..22
2.4 บทสรุป..28
บทที่ 3 การควบคุมดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์..29
3.1 บทนำ..29
3.2 โครงสร้างการควบคุมดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว..29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 หลักการออกแบบวงจรชดเชยชนิดอนาล็อก.....33
3.4 บทสรุป.....37
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว.....38
4.1 บทนำ.....38
4.2 การออกแบบและการจำลองผลการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง.....38
4.2.1 การออกแบบส่วนส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง.....38
4.2.2 การจำลองการทำงานของส่วนจ่ายกำลัง.....41
4.3 การออกแบบระบบควบคุม.....44
4.4 บทสรุป.....51
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....52
5.1 บทนำ.....52
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....52
5.3 การทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์.....51
5.4 การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะคงตัว.....55
5.5 การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะพลวัต.....57
5.6 การทดลองประสิทธิภาพ.....58
5.7 บทสรุป.....59
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....62
เอกสารอ้างอิง.....64
ภาคผนวก.....65
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์แบบจำลองดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว.....66
ภาคผนวก ข โปรแกรม MATLAB® สำหรับสร้างผลการตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน.....89
ภาคผนวก ค บทความวิชาการฉบับสมบูรณ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....92
ประวัติผู้เขียน.....98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 รายการอุปกรณ์ในดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ 50
5.1 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกในสภาวะคงตัวของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและค่าโหลดที่ทางออกต่างๆ... 56
5.2 ผลการวัดค่าประสิทธุภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและค่าโหลดที่ทางออกต่างๆ 58
5.3 ผลการวัดค่าไลน์เรกกูเลชันของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลงจาก 20V เป็น120V ที่ค่าโหลดต่างๆ... 60
5.4 ผลการวัดค่าโหลดเรกกูเลชันของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0% เป็น 100% ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าต่างๆ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว	7
2.2	การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_1T_s	8
2.3	การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_2T_s	9
2.4	การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_3T_s	10
2.5	รูปสัญญาณการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง	12
2.6	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง	16
2.7	แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง	21
2.8	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่สวิตช์ SW	24
2.9	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_1	25
2.10	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_2	25
2.11	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_3	26
2.12	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง	27
2.13	แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กความถี่ต่ำ	27
3.1	ไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว	29
3.2	วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	30
3.3	วงจรชดเชยชนิดอนาล็อก	30
3.4	วงจร PWM (Pulse-Width Modulator)	31
3.5	บล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว	32
3.6	บล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย	32
3.7	วงจรชดเชยชนิดอนาล็อก Type 2	33
4.1	Schematic ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice™	41
4.2	ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์ SW	42
4.3	ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำสวิตช์ L_1	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.4 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 42

4.5 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 43

4.6 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 43

4.7 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 43

4.8 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 44

4.9 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 44

4.10 บล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กของ ดีซี – ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว 44

4.11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิง $G_V(s)$ 46

4.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_V(s)$, $G_C(s)$ และ $T(s)$ 48

4.13 Schematic ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ 50

4.13 ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ.....................................50

4.15 ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่นำไปใช้เป็น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์หลัก 51

5.1 รูปสัญญาณของแรงดันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์ SW (MOSFET)...................53

5.2 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 53

5.3 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 53

5.4 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 54

5.5 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 54

5.6 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 54

5.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า D_3 55

5.8 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 55

5.9 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีการ เปลี่ยนแปลง...56

5.10 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อโหลดที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลง 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.11 ผลการทดลองการตอบสนองที่สภาวะพลวัตของดีซี –ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ....57

5.12 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ 59

5.13 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลด 100%....61

5.14 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลด 8% 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

C_1	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1
C_2	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2
C_{C1}	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{C1}
C_{C2}	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{C2}
CCM	โหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง
D_1	ดิวตี้ไซเคิลของระยะเวลาช่วงที่ 1 ที่สภาวะคงตัว
$D_{1,max}$	ดิวตี้ไซเคิลสูงสุดของระยะเวลาช่วงที่ 1 ที่สภาวะคงตัว
DCM	โหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง
d_1	ดิวตี้ไซเคิลของระยะเวลาช่วงที่ 1
d_2	ดิวตี้ไซเคิลของระยะเวลาช่วงที่ 2
d_3	ดิวตี้ไซเคิลของระยะเวลาช่วงที่ 3
$\tilde{d}_1$	ดิวตี้ไซเคิลของระยะเวลาช่วงที่ 1 ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก
f_{co}	ความถี่ครอสโอเวอร์
f_s	ความถี่ในการสวิตช์
F_M	ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงจร PWM
g_{s1}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างสวิตช์ SW กับไดโอด D_1
g_{s2}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างสวิตช์ SW กับไดโอด D_2
g_{s3}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างสวิตช์ SW กับไดโอด D_3
g_{1s}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_1 กับสวิตช์ SW
g_{12}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_1 กับไดโอด D_2
g_{13}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_1 กับไดโอด D_3
g_{2s}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_2 กับสวิตช์ SW
g_{21}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_2 กับไดโอด D_1
g_{23}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_2 กับไดโอด D_3
g_{3s}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_3 กับสวิตช์ SW
g_{31}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_3 กับไดโอด D_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

g_{32}	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโอด D_3 กับไดโอด D_2
$G_C(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงจรชดเชยชนิดอนาล็อก
$G_{dv}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกกับดิวตี้ไซเคิล
$G_V(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงจรกำลังไฟฟ้า
$H(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนเซนเซอร์
j_s	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์ SW
j_1	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1
j_2	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2
j_3	ข้อมูลแบบจำลองของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3
k	ค่าคงที่
K	ค่าของ K - Factor
L_1	ตัวเหนี่ยวนำ L_1
L_2	ตัวเหนี่ยวนำ L_2
L_{es}	ข้อมูลแบบจำลองด้วยตัวความเหนี่ยวนำที่สวิตช์ SW
M	อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกกับแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า
I_g	กระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าที่สภาวะคงตัว
I_{L1P}	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่สภาวะคงตัว
I_{L2P}	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 ที่สภาวะคงตัว
I_s	กระแสไฟฟ้าที่สวิตช์ SW ที่สภาวะคงตัว
I_{12}	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1, D_2 ที่สภาวะคงตัว
I_1	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ที่สภาวะคงตัว
I_2	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ที่สภาวะคงตัว
I_3	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ที่สภาวะคงตัว
i_{C1}	กระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เวลาใดๆ
i_{C2}	กระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 ที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

i_{L1}	กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำที่เวลาใดๆ
i_{L2}	กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำที่เวลาใดๆ
i_{L1P}	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1
i_{L2P}	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2
i_s	กระแสไฟฟ้าที่สวิตซ์ SW ที่เวลาใดๆ
i_1	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ที่เวลาใดๆ
i_2	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ที่เวลาใดๆ
i_3	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ที่เวลาใดๆ
$\tilde{i}_s$	กระแสไฟฟ้าที่สวิตซ์ SW ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{i}_1$	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{i}_2$	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{i}_3$	กระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก
$\langle i_s \rangle_{T_S}$	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่สวิตซ์ SW ในระยะคาบเวลาของการสวิตซ์ (T_s)
$\langle i_1 \rangle_{T_S}$	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_1 ในระยะคาบเวลาของการสวิตซ์ (T_s)
$\langle i_2 \rangle_{T_S}$	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_2 ในระยะคาบเวลาของการสวิตซ์ (T_s)
$\langle i_3 \rangle_{T_S}$	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_3 ในระยะคาบเวลาของการสวิตซ์ (T_s)
P_{in}	กำลังไฟฟ้าที่ทางเข้าที่สภาวะคงตัว
$P_{in,max}$	กำลังไฟฟ้าที่ทางเข้าสูงสุดที่สภาวะคงตัว
P_{out}	กำลังไฟฟ้าที่ทางออกที่สภาวะคงตัว
R	ความต้านทานของโหลดที่ทางออก
R_{C1}	ความต้านทานของ R_{C1}
R_{C2}	ความต้านทานของ R_{C2}
R_{es}	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานของที่สวิตซ์ SW
R_{e1}	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานของที่ไดโอด D_2
R_{e2}	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานของที่ไดโอด D_2
R_{e3}	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานที่ไดโอด D_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

r_s	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานที่สวิตช์ SW
r_1	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานที่ไดโอด D_1
r_2	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานที่ไดโอด D_2
r_3	ข้อมูลแบบจำลองด้วยความต้านทานที่ไดโอด D_3
T_s	คาบเวลาของการสวิตช์ (s)
$T_{off,min}$	คาบเวลาต่ำสุดขณะสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า (s)
$T_{on,max}$	คาบเวลาสูงสุดขณะที่สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า (s)
$T(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
V	แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่สภาวะคงตัว
V_g	แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าที่สภาวะคงตัว
$V_{g,min}$	แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกต่ำสุดที่สภาวะคงตัว
V_M	ความสูงของแรงดันไฟฟ้าชนิดฟันเลื่อย
V_{ref}	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่สภาวะคงตัว
V_s	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ SW ที่สภาวะคงตัว
V_1	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ที่สภาวะคงตัว
V_2	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ที่สภาวะคงตัว
V_3	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ที่สภาวะคงตัว
v	แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่เวลาใดๆ
v_{C1}	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ C_1 ที่เวลาใดๆ
v_{C2}	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ C_2 ที่เวลาใดๆ
v_{L1}	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ L_1 ที่เวลาใดๆ
v_{L2}	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ L_2 ที่เวลาใดๆ
v_g	แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าที่เวลาใดๆ
v_s	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ SW ที่เวลาใดๆ
v_1	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ที่เวลาใดๆ
v_2	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ที่เวลาใดๆ
v_3	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\tilde{v}$	แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}'$	แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกจากส่วนเซนเซอร์ชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}_C$	แรงดันไฟฟ้าควบคุมชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}_s$	แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ SW ชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}_1$	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_1 ชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}_2$	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_2 ชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\tilde{v}_3$	แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด D_3 ชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็ก
$\langle v \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทางออกในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_{C1} \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุ C_1 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_{C2} \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุ C_2 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_{L1} \rangle_{T_s}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_{L2} \rangle_{T_s}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_g \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทางเข้าในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_s \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สวิตช์ SW ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_1 \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_1 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_2 \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_2 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
$\langle v_3 \rangle_{T_S}$	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไดโอด D_3 ในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s)
η	ประสิทธิภาพ
Δv	แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่ทางออกสูงสุด
Δv_{C1}	แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่ C_1 สูงสุด
θ_C	มุมเฟสของวงจรชดเชย
ω_C	ความถี่เชิงมุมซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างความถี่เชิงมุมของซีโร่ z_1 กับโพล p_2
ω_{co}	ความถี่เชิงมุมครอสโอเวอร์
ω_{p2}	ความถี่เชิงมุมของโพล p_2
ω_s	ความถี่เชิงมุมในการสวิตช์
ω_{z1}	ความถี่เชิงมุมของซีโร่ z_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเกษตรกรในพื้นที่ห่างไกลนิยมนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าเพื่อการเกษตรกรรมมากขึ้น เช่น การนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ดังกล่าวมาเป็นพลังงานสำหรับการสูบน้ำเข้าพื้นที่การเพาะปลูกด้วยปั๊มน้ำชนิดแรงดันไฟฟ้าตรง เป็นต้น ทั้งนี้เพราะพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้สะดวกในพื้นที่ห่างไกลมากกว่าพลังงานชนิดอื่น นอกจากนั้นพลังงานชนิดนี้เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดไม่สร้างปัญหาเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร และเป็นพลังงานมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ขั้นตอนการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับปั๊มน้ำชนิดแรงดันไฟฟ้าตรงโดยตัวเกษตรกรเองอาจมีปัญหาเกิดขึ้นได้หลายประการอันเนื่องมาจากการขาดความรู้และความเข้าใจของเกษตรกร เช่น การที่เกษตรกรนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกไม่สอดคล้องกับพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปั๊มน้ำชนิดแรงดันไฟฟ้าตรง เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีทั้งแบบที่เป็นรูปผลึก (Crystal) ที่มีแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกต่ำแต่จ่ายกระแสไฟฟ้าตรงได้พิกัดสูง [1] และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) ที่มีแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกสูงแต่จ่ายกระแสไฟฟ้าตรงได้พิกัดต่ำ [2] ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ปั๊มน้ำนั้นเสียหายได้ และแม้ว่าเกษตรกรได้เลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกสอดคล้องกับพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของปั๊มน้ำชนิดแรงดันไฟฟ้าตรงแล้ว แต่ยังอาจเกิดปัญหาที่อาจทำให้ปั๊มน้ำเสียหายได้อีก หากเกษตรกรนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับปั๊มน้ำชนิดแรงดันไฟฟ้าตรงโดยตรง ทั้งนี้เพราะแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แปรผันตามปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของวัน ซึ่งการที่แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นสาเหตุให้ปั๊มน้ำทำงานได้ไม่สมบูรณ์หรืออาจทำให้ปั๊มน้ำนั้นเสียหายได้ ด้วยปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวทางศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (**NECTEC**) ได้มีการนำเสนอหัวข้องานวิจัยเพื่อพัฒนาดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่จะถูกนำมาเป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับปั๊มน้ำแรงดันไฟฟ้าตรง โดยคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถรองรับแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งที่เปลี่ยนแปลงตามชนิดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของวัน และคอนเวอร์เตอร์นั้นต้องสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าตรงให้มีค่าคงที่ตรงตามค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ปั๊มน้ำต้องการ ดังนั้นดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการนี้จึงถูกกำหนดพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้สามารถรองรับพิสัยของแรงดันไฟฟ้าตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้กว้าง 20 – 120V และสามารถใช้งานได้กับปั๊มแรงดันน้ำไฟฟ้าตรงสองชนิดคือ ปั๊มน้ำชนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาดพิกัด 24V (240W) และขนาดพิกัด 12V (120W) นอกจากนั้น **NECTEC** ยังได้กำหนดคุณสมบัติเพิ่มเติมคือ ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะการใช้งานจริงคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องมีความเชื่อถือสูง มีระบบป้องกันการใช้งานผิดพลาดของเกษตรกรหลากหลายชนิด สามารถทำงานในบริเวณพื้นที่การเกษตรที่อาจมีอุณหภูมิสูงหรือมีฝนตก และราคาประหยัด เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องถูกนำไปใช้ในพื้นที่ห่างไกล และถูกนำไปใช้โดยเกษตรกรที่อาจจะมีความรู้จำกัด งานวิจัยเพื่อพัฒนาดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรก ดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก และส่วนที่สอง ดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก โดยดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ส่วนที่สองนี้เป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ เนื่องจากหากไม่มีพลังงานไฟฟ้าจากดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักแล้ว จะทำให้ดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักไม่สามารถทำงานได้ ข้อกำหนดพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เดียวกับคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักที่มีแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 20 – 120V และต้องสร้างแรงดันไฟฟ้าตรงคงที่ที่ทางออก 18 V (3W) ให้กับระบบทางไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นผลงานการวิจัยเพื่อการศึกษาและพัฒนาดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ การออกแบบ และการสร้างดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก โดยผู้วิจัยได้นำเสนอดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว [3] ที่มีข้อกำหนดพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ถูกกำหนดให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode, DCM) [4] การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก (Analog Feedback Control System) ที่ถูกออกแบบด้วยเทคนิคเชิงความถี่ (Frequency Response Analysis) [5] ซึ่งเทคนิคนี้ต้องใช้แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก (AC Small Signal Model) ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวในการออกแบบ โดยแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกวิเคราะห์และจำลองขึ้นด้วยวิธีการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์ (Averaged Switch Model) [6] หลังจากนั้นได้นำแบบจำลองที่ได้มาวิเคราะห์ระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก เพื่อการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อก (Analog Compensator Circuit) ของระบบควบคุมดังกล่าวซึ่งทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้มีค่าคงที่แม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า และหรือมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก การวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าตัวแปรของวงจรชดเชยอนาล็อกใช้วิธี K – Factor [7] ผลการวิเคราะห์ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวตามที่นำเสนอถูกนำมาตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องโดยการสร้างคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ แล้วนำมาทดสอบการทำงานทั้งที่สภาวะคงตัว (Steady – State

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Response) สภาวะพลวัต (Dynamic Response) และทดสอบประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลการทดลองที่ต้องการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงานของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว

2. ศึกษาวิธีการจำลองแบบจำลองชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวโดยวิธีการเฉลี่ยการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์

3. ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อกและการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อก

4. ออกแบบ สร้าง และทดสอบดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยมีแนวคิดและข้อพิจารณาในการใช้ดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าตรงจากค่าหนึ่งให้เป็นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถแบ่งเป็นสามชนิดคือ บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) บูสท์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) และบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์ (Buck – Boost Converter) คอนเวอร์เตอร์ชนิดแรกทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าสูงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำ คอนเวอร์เตอร์ชนิดที่สองทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูง ส่วนคอนเวอร์เตอร์ชนิดที่สามสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งแปลงแรงดันไฟฟ้าตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าสูงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำหรือแปลงแรงดันไฟฟ้าตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อกำหนดพิกัดของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักที่ต้องการ (แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า 20 – 120V และแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก 18V) จึงมีเพียงบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) หรือบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์ (Buck – Boost Converter) เท่านั้นที่สามารถทำงานได้ แต่เมื่อพิจารณาจากข้อกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางต่ำสุด 20V และการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อุปกรณ์ต่างๆ ภายในคอนเวอร์เตอร์ จึงสรุปได้ว่ามีเพียงบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์เท่านั้นที่สามารถทำงานได้ตามพิกัดที่ต้องการ งานวิจัยนี้จึงเลือกบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์เริ่มต้นในการวิจัย ต่อมาเมื่อพิจารณาจากบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานซึ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบวงจรเดียว และพิจารณาจากพิกัดแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าซึ่งมีพิสัยกว้าง บัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์แบบวงจรเดียวมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีค่าสูงสุดตามพิกัดการที่คอนเวอร์เตอร์จะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ตามพิกัดที่ต้องการได้ คอนเวอร์เตอร์ต้องทำงานที่ค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) มีค่าต่ำมากซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติ [8] นอกจากนั้นยังมีข้อจำกัดอีกข้อหนึ่งที่สำคัญคือ บัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์แบบเดียวมีทิศทางของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำไปต่อร่วมกับคอนเวอร์เตอร์หลัก [9] ผู้วิจัยจึงได้พิจารณานำเสนอบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์แบบสองวงจรคือ ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานสองวงจรต่อคาสเคดกัน โดยมีคุณสมบัติที่แก้ข้อจำกัดของบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์แบบวงจรเดียวได้ แต่อย่างไรก็ตามบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานสองชุดต่อคาสเคดกันก็มีของจำกัดที่สำคัญคือต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์จำนวนสองชุด โดยสวิตช์แต่ละชุดมีระบบควบคุมการทำงานแยกกัน ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นทั้งจากอุปกรณ์สวิตช์และวงจรขับอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว ซึ่งประกอบด้วยบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานสองชุดต่อคาสเคดกัน และมีอุปกรณ์สวิตช์เพียงตัวเดียวเพื่อลดค่าใช้จ่าย คอนเวอร์เตอร์แบบนี้ได้มีผู้ทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนหนึ่ง เช่น งานวิจัยของ Bill Andreycak [3] ซึ่งได้เน้นการวิจัยในเรื่องการใช้วงจรควบคุมชนิดพิเศษที่การจัดหาทำได้ยาก งานวิจัยของ P.J. Akhiljith และคณะ [10] ซึ่งได้ทำการวิจัยเฉพาะส่วนการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB® เท่านั้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอ การวิเคราะห์ การออกแบบ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice™ การสร้าง และการทดสอบดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว ซึ่งต้องนำไปใช้สำหรับการจ่ายพลังไฟฟ้าให้กับคอนเวอร์เตอร์หลักที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวนี้มีพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ากว้าง 20 – 120V แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก 18V ขนาดพิกัด 3W คอนเวอร์เตอร์ที่วิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง และส่วนของระบบควบคุม โดยการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงถูกออกแบบให้ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะการใช้พลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์หลักที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีพิสัยกระแสไฟฟ้าที่ต้องการกว้างตามการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์หลัก การควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวถูกกระทำโดยการปรับเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิลที่ซึ่งทำงานในโหมดการควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (Voltage Mode Control: VMC) ในส่วนของระบบควบคุมเป็นระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อกที่ถูกออกแบบด้วยเทคนิคเชิงความถี่ โดยในขั้นตอนการออกแบบส่วนของระบบควบคุมต้องใช้แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าตรง ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองนี้ด้วยวิธีการเฉลี่ยการทำงานของสวิตซ์ หลักการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองของส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าตรงด้วยวิธีนี้คือ การจำลองอุปกรณ์สวิตซ์ด้วยอุปกรณ์เชิงเส้น ซึ่งมีข้อดีคือสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์ได้หลากหลายชนิดทั้งสภาวะคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวและสภาวะพลวัต ส่วนการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกของส่วนของระบบควบคุม ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าของตัวแปรของวงจรชดเชยอนาล็อกด้วยวิธี K - Factor

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการทำงาน การวิเคราะห์ การออกแบบ และการสร้างดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว ซึ่งประกอบด้วยส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าตรง และส่วนของระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก ซึ่งทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้คงที่ และมีเสถียรภาพถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า และหรือ กระแสไฟฟ้าตรงที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Specifications) ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ ดังนี้คือ

- แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า 20 – 120V
- แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก 18V
- กำลังไฟฟ้าที่ทางออก 3W
- ความถี่ในการสวิตช์ 100kHz
- ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยไม่น้อย 60%
- ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงานของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว
2. ศึกษาระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก และการออกแบบวงจรชดเชยชนิดอนาล็อก
3. ออกแบบดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ
4. สร้างและทดลองดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ
5. วิจารณ์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว

2.1 บทนำ

ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าสองส่วนคือ ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง และส่วนของระบบควบคุม เนื้อหาในวิทยานิพนธ์บทนี้นำเสนอเฉพาะการวิเคราะห์ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวเท่านั้น โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์หลักการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง เพื่อนำไปใช้ในออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งแบบจำลองที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่จะนำเสนอในบทต่อไป

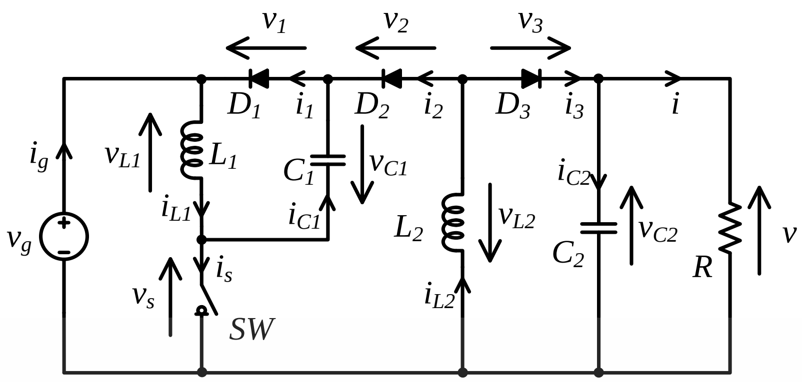
2.2 ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

การวิเคราะห์ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการอธิบายการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งประกอบด้วยรูปสัญญาณการทำงานและสมการที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่สองเป็นการอธิบายวิธีการจำลองส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงเพื่อให้ได้แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 หลักการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยบัค – บูสท์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานสองวงจรต่อคาสเคดกัน วงจรแรกประกอบด้วยสวิตช์ SW , ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , ไดโอด D_1 และตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 ส่วนวงจรที่สองประกอบด้วยสวิตช์ SW , ตัวเหนี่ยวนำ L_2 , ไดโอด D_3 และตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 จากวงจรแรกเป็นแรงไฟฟ้าที่ทางเข้าให้กับวงจรที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



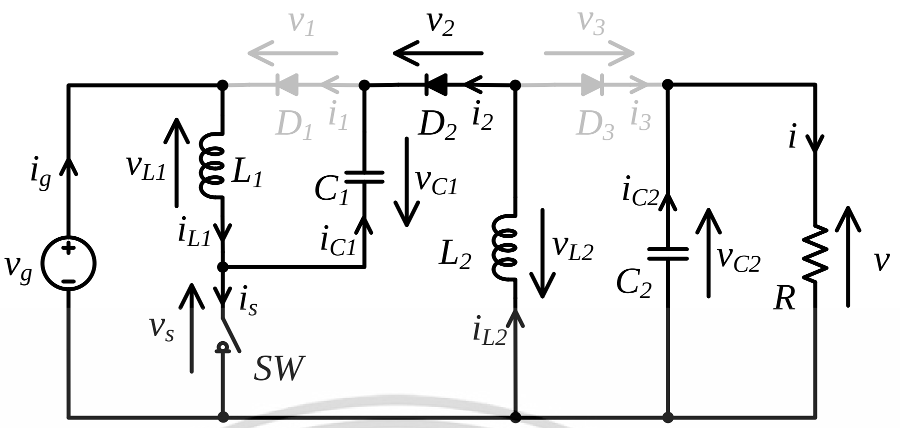
รูปที่ 2.1 ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว

เมื่อพิจารณาการทำงานของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวที่สภาวะคงตัว (Steady - State Response) และทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง สวิตช์ SW ทำงานด้วยความถี่ในการสวิตช์ f_s ซึ่งมีคาบเวลา $T_s = 1/f_s$ สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกเป็นสามช่วงในหนึ่งคาบเวลา คือ d_1T_s , d_2T_s และ d_3T_s โดยที่

$$d_1T_s + d_2T_s + d_3T_s = T_s \tag{2.1}$$

- **ช่วงเวลาที่ 1** (d_1T_s): สวิตช์ SW นำกระแสไฟฟ้า ไดโอด D_1 และ D_3 ไม่นำกระแสไฟฟ้า ไดโอด D_2 นำกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งตัวเหนี่ยวนำ L_1 อยู่ในสภาวะสะสมพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า v_g และตัวเหนี่ยวนำ L_2 อยู่ในสภาวะสะสมพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 ดังนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 : (i_{L1}) และ L_2 : (i_{L2}) จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันพลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 ถูกถ่ายเทไปยังโหลดความต้านทาน R ช่วงเวลา d_1T_s นี้สามารถแสดงสมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงได้ดังสมการที่ (2.2) - (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_1T_s

$$v_s = 0 \tag{2.2}$$

$$v_1 = v_g + v_{C1} \tag{2.3}$$

$$v_2 = 0 \tag{2.4}$$

$$v_3 = v_{C1} + v_{C2} \tag{2.5}$$

$$v_{L1} = v_g \tag{2.6}$$

$$v_{L2} = v_{C1} \tag{2.7}$$

$$i_s = i_{L1} + i_{L2} \tag{2.8}$$

$$i_1 = 0 \tag{2.9}$$

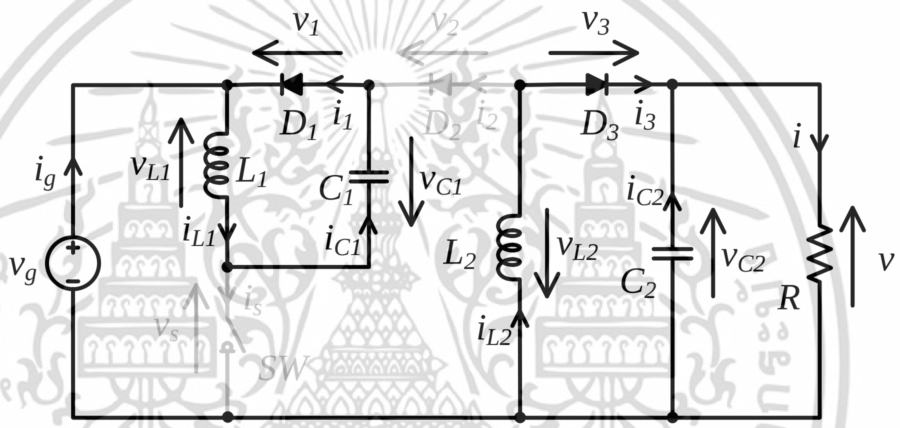
$$i_2 = i_{L2} \tag{2.10}$$

$$i_3 = 0 \tag{2.11}$$

$$i_{C1} = -i_{L2} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ช่วงเวลาที่ 2 (d_2T_s)**: สวิตช์ SW ไม่นำกระแสไฟฟ้า ไดโอด D_1 และ D_3 นำกระแสไฟฟ้า ไดโอด D_2 ไม่นำกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ทั้งสองอยู่ในสภาวะจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้สะสมไว้ในช่วงเวลา d_1T_s ดังนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 : (i_{L1}) และ L_2 : (i_{L2}) จึงมีค่าลดลง ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 อยู่ในสภาวะสะสมพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่สะสมใน L_1 ถูกถ่ายเทไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 และพลังงานไฟฟ้าที่สะสมใน L_2 ถูกถ่ายเทไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 และโหลดความต้านทาน R ช่วงเวลา d_2T_s นี้ สามารถแสดงสมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงดังสมการที่ (2.13) - (2.23)



รูปที่ 2.3 การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_2T_s

$$v_s = v_g + v_{C1} \tag{2.13}$$

$$v_1 = 0 \tag{2.14}$$

$$v_2 = v_g - v_{C2} \tag{2.15}$$

$$v_3 = 0 \tag{2.16}$$

$$v_{L1} = -v_{C1} \tag{2.17}$$

$$v_{L2} = -v_{C2} \tag{2.18}$$

$$i_s = 0 \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

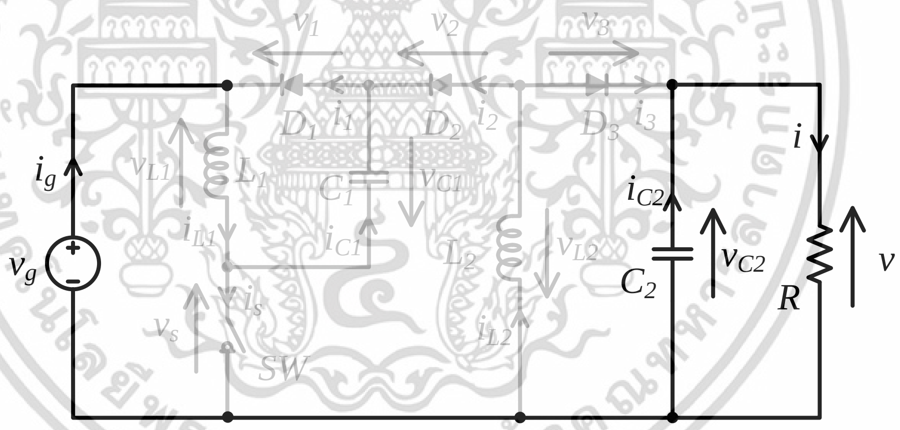
$$i_1 = i_{L1} \tag{2.20}$$

$$i_2 = 0 \tag{2.21}$$

$$i_3 = i_{L2} \tag{2.22}$$

$$i_{C1} = i_{L1} \tag{2.23}$$

- **ช่วงเวลาที่ 3 (d_3T_s)**: สวิตช์ SW ไม่นำกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 : (i_{L1}) และ L_2 : (i_{L2}) หยุดไหล ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 ไม่นำกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.4 พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 ถูกถ่ายเทไปยังโหลดความต้านทาน R ช่วงเวลา d_3T_s นี้สามารถแสดงสมการของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงดังสมการที่ (2.24) - (2.32)



รูปที่ 2.4 การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงช่วงเวลา d_3T_s

$$v_s = v_g \tag{2.24}$$

$$v_1 = v_{C1} \tag{2.25}$$

$$v_2 = v_g - v_{C1} \tag{2.26}$$

$$v_3 = v_{C2} \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_s = 0 \quad (2.28)$$

$$i_1 = 0 \quad (2.29)$$

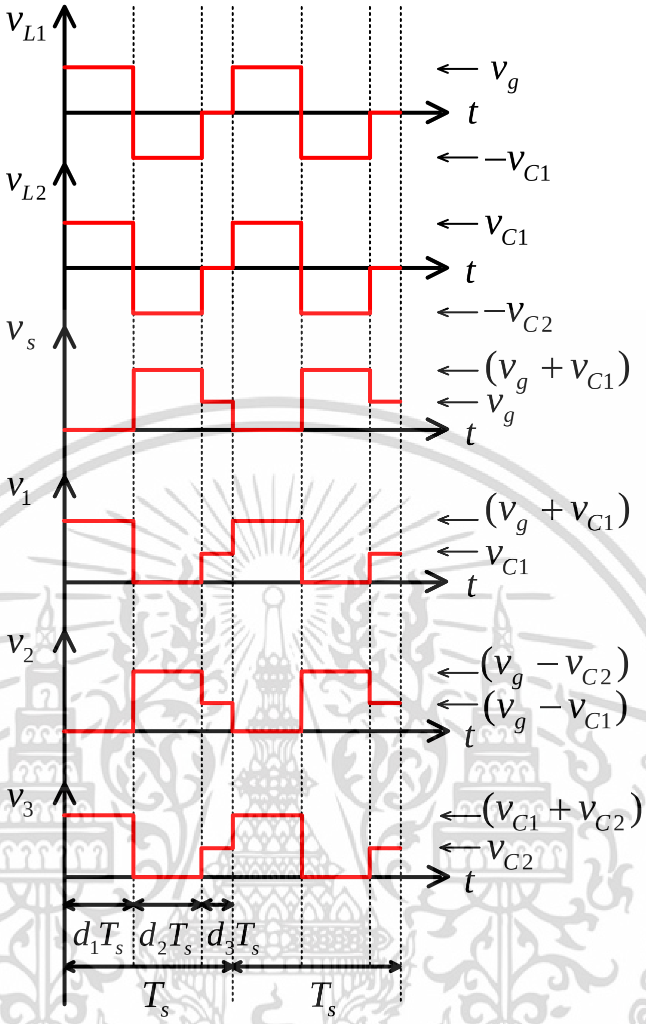
$$i_2 = 0 \quad (2.30)$$

$$i_3 = 0 \quad (2.31)$$

$$i_{C1} = 0 \quad (2.32)$$

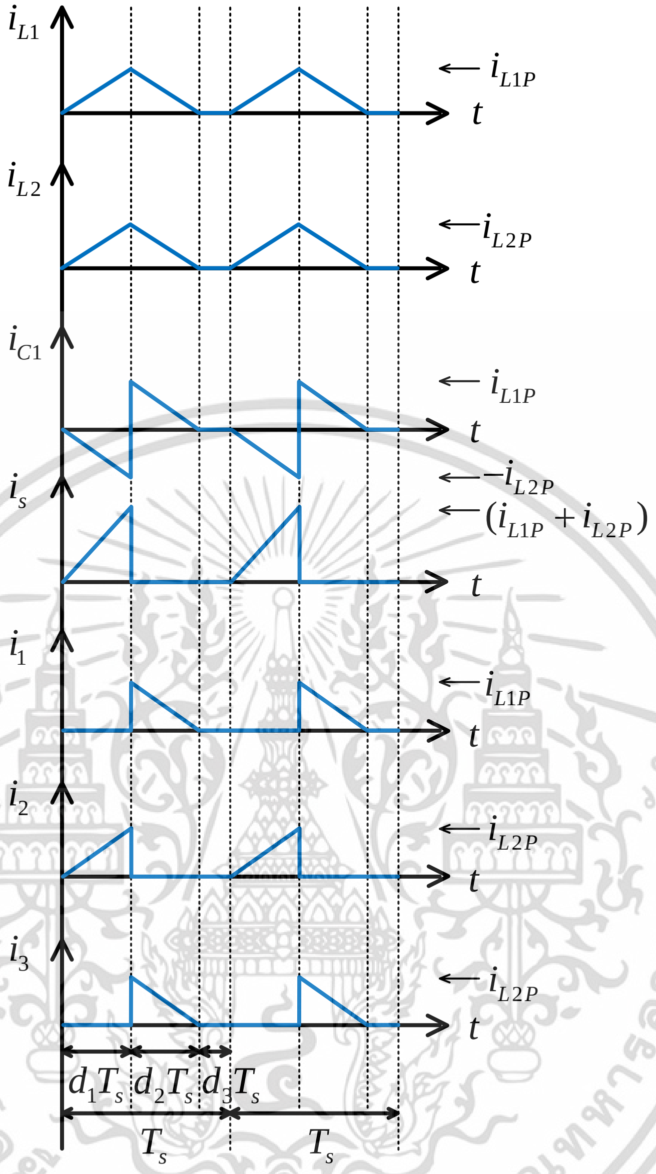
การทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงนี้สามารถแสดงรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.5 (ก) และแสดงรูปสัญญาณของกระแสไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.5 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปสัญญาณของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 2.5 รูปสัญญาณการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

2.2.2 การออกแบบส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

เงื่อนไขการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวได้ถูกกำหนดไว้ว่าเมื่อส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ทางออกมีค่าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีค่าต่ำสุด ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงนี้ต้องทำงานในโหมดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นโหมดซึ่งอยู่ระหว่างโหมดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง (Continuous Current Mode, CCM) กับโหมดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode, DCM) ซึ่งจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขนี้ผู้วิจัยจึงเลือกออกแบบส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง และได้ออกแบบในขณะที่ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงทำงานที่สภาวะคงตัว ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุด ($D_{1,max}$) แสดงดังสมการที่ (2.33)

$$D_{1,max} = \frac{1}{1+\sqrt{\frac{V_{g,min}}{V}}} \tag{2.33}$$

ค่าคาบเวลาการสวิตช์ (T_s) แสดงดังสมการที่ (2.34)

$$T_s = \frac{1}{f_s} \tag{2.34}$$

ค่าคาบเวลาสูงสุดขณะที่สวิตช์ SW นำกระแสไฟฟ้า ($T_{on,max}$) และคาบเวลาต่ำสุดขณะสวิตช์ SW ไม่นำกระแสไฟฟ้า ($T_{off,min}$) แสดงดังสมการที่ (2.35) และ (2.36)

$$T_{on,max} = D_{1,max} T_s \tag{2.35}$$

$$T_{off,min} = T_s - T_{on,max} \tag{2.36}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ทางเข้าแสดงดังสมการที่ (2.37) โดยคำนวณจากค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทางออก และค่าประสิทธิภาพ (η) ตามพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กำหนด

$$P_{in,max} = \frac{P_{out}}{\eta} \tag{2.37}$$

ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ทางเข้าแสดงดังสมการที่ (2.38)

$$I_{g,max} = \frac{P_{in,max}}{V_{g,min}} \tag{2.38}$$

ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 แสดงดังสมการที่ (2.39) และ (2.40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{L1P} = 2\frac{I_{g,max}}{D_{1,max}} \tag{2.39}$$

$$L_1 = \frac{V_{g,min}T_{on,max}}{I_{L1P}} \tag{2.40}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 แสดงดังสมการที่ (2.41) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของวงจรที่สอง และค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 แสดงดังสมการที่ (2.42)

$$V_{C1} = V_{g,min}\frac{T_{on,max}}{T_{off,min}} \tag{2.41}$$

$$C_1 = \frac{\Delta i_{L1}T_s}{8\Delta v_{C1}} \tag{2.42}$$

ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ L_2 และค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_2 แสดงดังสมการที่ (2.43) และ (2.44)

$$I_{L2P} = \frac{2}{1-D_{1,max}}\frac{P_{out}}{V} \tag{2.43}$$

$$L_2 = V_{C1}\frac{T_{on,max}}{I_{L2P}} \tag{2.44}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 แสดงดังสมการที่ (2.45) ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกตามพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กำหนด (18V) และค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 แสดงดังสมการที่ (2.46)

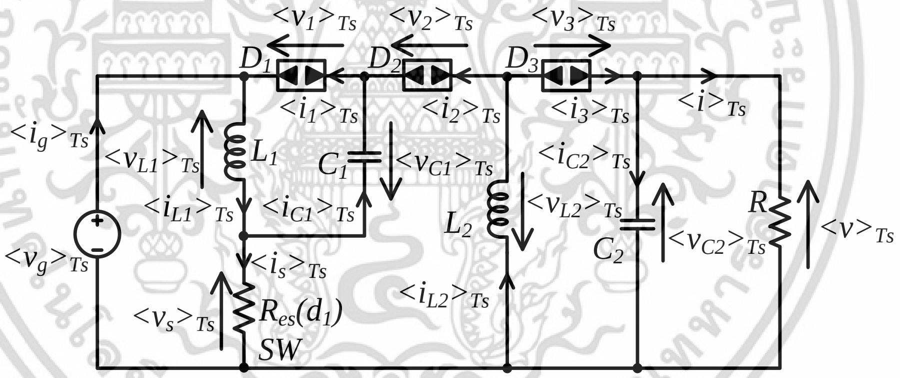
$$V_{C2} = V_{C1}\frac{D_{1,max}}{1-D_{1,max}} \tag{2.45}$$

$$C_2 = \frac{\Delta i_{L2}T_s}{8\Delta v} \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

ระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อกที่ถูกออกแบบด้วยเทคนิคเชิงความถี่ ซึ่ง การออกแบบระบบควบคุมชนิดนี้ต้องการใช้แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว โดยวิธีการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์ในคาบเวลาการสวิตช์ (T_s) เป็นการจำลองอุปกรณ์ที่ทำหน้าเป็นสวิตช์ซึ่งได้แก่ สวิตช์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 ให้มีคุณสมบัติเสมือนเป็นอุปกรณ์ชนิดเชิงเส้น หลักการของวิธีนี้คือการใช้ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ของแต่ละอุปกรณ์สวิตช์มาคำนวณแทนค่าของแรงดันไฟฟ้าและค่าของกระแสไฟฟ้าที่เวลาใดๆ ของอุปกรณ์นั้นๆ แบบจำลองจากผลการจำลองอุปกรณ์นี้แสดงดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งสวิตช์ SW เสมือนเป็นอุปกรณ์ความต้านทาน R_{es} ส่วนไดโอด D_1, D_2 และ D_3 เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกำลังไม่อิสระ (Dependence Power Source)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

เมื่อพิจารณาส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงซึ่งทำงานที่สภาวะคงตัว และพิจารณาจากรูปสัญญาณการทำงานของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 แสดงดังสมการที่ (2.47) และ (2.48)

$$\langle v_{L1}\rangle_{T_s} = d_1\langle v_g\rangle_{T_s} + d_2\left(-\langle v_{C1}\rangle_{T_s}\right) = 0 \tag{2.47}$$

$$\langle v_{L2}\rangle_{T_s} = d_1\langle v_{C1}\rangle_{T_s} + d_2\left(-\langle v_{C2}\rangle_{T_s}\right) = 0 \tag{2.48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 แสดงดังสมการที่ (2.49) และ (2.50)

$$i_{L1P} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{L_1} d_1 T_s \tag{2.49}$$

$$i_{L2P} = \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{L_2} d_1 T_s \tag{2.50}$$

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 แสดงดังสมการที่ (2.51)

$$\langle i_{C1} \rangle_{T_s} = \frac{1}{2}(-i_{L2P})d_1 + \frac{1}{2}(i_{L1P})d_2 \tag{2.51}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง d_1 และ d_2 แสดงดังสมการที่ (2.52) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.47)(2.48)(2.49)(2.50) และ (2.51)

$$d_2 = d_1 \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}} = d_1 \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{\langle v \rangle_{T_s}} = d_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \tag{2.52}$$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ของสวิตช์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 แสดงดังสมการที่ (2.53)(2.54)(2.55) และ (2.56) ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ของสวิตช์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 แสดงดังสมการที่ (2.57)(2.58)(2.59) และ (2.60) ตามลำดับ

$$\langle v_s \rangle_{T_S} = d_1 \cdot 0 + d_2 \left(\langle v_g \rangle_{T_S} + \langle v_{C1} \rangle_{T_S} \right) + d_3 \left(\langle v_g \rangle_{T_S} \right) \tag{2.53}$$

$$\langle v_1 \rangle_{T_S} = d_1 \left(\langle v_g \rangle_{T_S} + \langle v_{C1} \rangle_{T_S} \right) + d_2 \cdot 0 + d_3 \left(\langle v_{C1} \rangle_{T_S} \right) \tag{2.54}$$

$$\langle v_2 \rangle_{T_S} = d_1 \cdot 0 + d_2 \left(\langle v_g \rangle_{T_S} - \langle v_{C2} \rangle_{T_S} \right) + d_3 \left(\langle v_g \rangle_{T_S} - \langle v_{C1} \rangle_{T_S} \right) \tag{2.55}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle v_3\rangle_{T_S} = d_1\left(\langle v_{C1}\rangle_{T_S} + \langle v_{C2}\rangle_{T_S}\right) + d_2\cdot 0 + d_3\left(\langle v_{C2}\rangle_{T_S}\right) \tag{2.56}$$

$$\langle i_s\rangle_{T_S} = \frac{1}{2}\left(i_{L1P} + i_{L2P}\right)d_1 \tag{2.57}$$

$$\langle i_1\rangle_{T_S} = \frac{1}{2}\left(i_{L1P}\right)d_2 \tag{2.58}$$

$$\langle i_2\rangle_{T_S} = \frac{1}{2}\left(i_{L2P}\right)d_1 \tag{2.59}$$

$$\langle i_3\rangle_{T_S} = \frac{1}{2}\left(i_{L2P}\right)d_2 \tag{2.60}$$

ผลจากสมการที่ (2.1) (2.47) - (2.60) ทำให้สามารถคำนวณค่าขนาดข้อมูลของแบบจำลองสวิตช์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 ได้แก่ค่าเฉลี่ยในระยะคาบเวลาของการสวิตช์ (T_s) ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่าขนาดแบบจำลองความต้านทานซึ่งได้จากการจำลองดังนี้คือ

- **ข้อมูลของสวิตช์** SW

$$\langle v_s\rangle_{T_s} = \langle v_g\rangle_{T_s} \tag{2.61}$$

$$\langle i_s\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{R_{es}\left(d_1\right)} \tag{2.62}$$

$$\langle p_s\rangle_{T_s} = \langle v_s\rangle_{T_s}\langle i_s\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s\rangle_{T_s}^2}{R_{es}(d_1)} \tag{2.63}$$

$$R_{es}(d_1) = \frac{2L_{es}}{d_1^2 T_s} \tag{2.64}$$

$$L_{es} = \frac{1}{\left(\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{\sqrt{L_1L_2}}\right)} \tag{2.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ข้อมูลของไดโอด** D_1

$$\left\langle v_1 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} \tag{2.66}$$

$$\left\langle i_1 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{R_{e2}(d_1)} \tag{2.67}$$

$$\left\langle p_1 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_1 \right\rangle_{T_s} \left\langle i_1 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^2}{R_{e1}(d_1)} \tag{2.68}$$

$$R_{e1}(d_1) = \frac{2L_1}{d_1^2 T_s} \tag{2.69}$$

$$R_{e2}(d_1) = \frac{2\sqrt{L_1 L_2}}{d_1^2 T_s} \tag{2.70}$$

- **ข้อมูลของไดโอด** D_2

$$\left\langle v_2 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} - \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} \tag{2.71}$$

$$\left\langle i_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{R_{e2}(d_1)} \tag{2.72}$$

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_2 \right\rangle_{T_s} \left\langle i_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^2}{R_{e2}(d_1)} - \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^2}{R_{e1}(d_1)} \tag{2.73}$$

- **ข้อมูลของไดโอด** D_3

$$\left\langle v_3 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v \right\rangle_{T_s} \tag{2.74}$$

$$\left\langle i_3 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{R_{e3}(d_1)} \tag{2.75}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle p_3 \rangle_{T_s} = \langle v_3 \rangle_{T_s} \langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{R_{e1}(d_1)} \tag{2.76}$$

$$R_{e3}(d_1) = \frac{2L_2}{d_1^2 T_s} \tag{2.77}$$

สมการของแบบจำลองของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2.61) – (2.77) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่ระบบควบคุมที่ถูกเลือกในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นเชิงเส้น ดังนั้นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวต้องถูกทำให้เป็นสมการเชิงเส้น โดยการรบกวนสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยสัญญาณเอซีขนาดเล็กรอบจุดการทำงาน (Operating point) ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงที่สภาวะคงตัว (Small Signal Analysis) ซึ่งสมการที่ (2.78) – (2.86) แสดงการรบกวนด้วยสัญญาณเอซีขนาดเล็กที่ค่าตัวแปรต่างๆ ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์จากการรบกวนดังกล่าวทำให้ได้แบบจำลองเชิงเส้นของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงสองแบบจำลองคือ แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง และแบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

$$d_1 = D_1 + \tilde{d}_1 \tag{2.78}$$

$$\langle v_s \rangle_{T_S} = V_s + \tilde{v}_s \tag{2.79}$$

$$\langle i_s \rangle_{T_S} = I_s + \tilde{i}_s \tag{2.80}$$

$$\langle v_1 \rangle_{T_S} = V_1 + \tilde{v}_1 \tag{2.81}$$

$$\langle i_1 \rangle_{T_S} = I_1 + \tilde{i}_1 \tag{2.82}$$

$$\langle v_2 \rangle_{T_S} = V_2 + \tilde{v}_2 \tag{2.83}$$

$$\langle i_2 \rangle_{T_S} = I_2 + \tilde{i}_2 \tag{2.84}$$

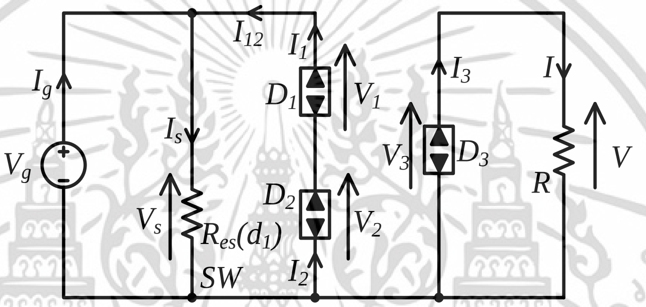
$$\langle v_3 \rangle_{T_S} = V_3 + \tilde{v}_3 \tag{2.85}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = I_3 + \tilde{i}_3 \tag{2.86}$$

2.3.1 แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่จุดการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง โดยพิจารณาการทำงานที่สภาวะคงตัว และไม่พิจารณาผลกระทบจากการรบกวนของสัญญาณเอซีขนาดเล็ก ซึ่งสามารถทำให้ประมาณได้ว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงนี้มีค่าคงที่ จึงทำให้สามารถพิจารณาผลของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 เสมือนลัดวงจร และตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 เสมือนเปิดวงจรแสดงดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

เมื่อพิจารณากรณีที่ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงมีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถประมาณได้ว่าเป็นการทำงานโดยไม่มีการสูญเสีย ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ทางเข้าได้จากสมการที่ (2.87) และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ทางออกได้จากสมการที่ (2.88)

$$P_{in} = V_g I_g = V_g \left(I_s - I_{12} \right) = \frac{D_1^2 T_s}{2L_1} V_g^2 \tag{2.87}$$

$$P_{out} = \frac{V^2}{R} \tag{2.88}$$

อัตราขยายของแบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.89)

$$\frac{V}{V_g} = D_1 \sqrt{\frac{R T_s}{2L_1}} = M(D_1) \tag{2.89}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่จุดการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง โดยพิจารณาเฉพาะผลกระทบจากการรบกวนของสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก เริ่มต้นการคำนวณจากสมการกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในคาบเวลาของการสวิตซ์ (T_s) ของสวิตซ์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 แสดงดังสมการที่ (2.90) – (2.93)

$$\langle i_s\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s\rangle_{T_s}}{R_{es}(d_1)} = I_s + \tilde{i}_s = f_s\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{2.90}$$

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1\rangle_{T_s}}{R_{e3}(d_1)} = I_1 + \tilde{i}_1 = f_1\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{2.91}$$

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_2\rangle_{T_s}}{(1-k)R_{e2}(d_1)} = I_2 + \tilde{i}_2 = f_2\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{2.92}$$

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{1}{R_{e1}(d_1)}\frac{\langle v_s\rangle_{T_s}}{\langle v_3\rangle_{T_s}} = I_3 + \tilde{i}_3 = f_3\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{2.93}$$

โดยที่ $k = \sqrt{L_2/L_1}$ และสมการที่ (2.90) – (2.93) ถูกกระจายออกด้วยเทคนิค Taylor Expansion ทำให้ได้สมการของแบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของสวิตซ์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 ตามสมการที่ (2.94) – (2.97)

$$\begin{aligned} I_s + \tilde{i}_s = {} & f_s(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) + \tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_s(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \\ & + \tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_s(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} + \tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \\ & + \tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} + \tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \\ & + \text{higher-order nonlinear terms} \end{aligned} \tag{2.94}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1+\tilde{i}_1 = f_1\left(V_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)+\tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_1\left(v_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s}$$
$$+\tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_1\left(V_s,v_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} +\tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_1\left(V_s,V_1,v_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \quad (2.95)$$
$$+\tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_1\left(V_s,V_1,V_2,v_3,D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} +\tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_1\left(V_s,V_1,V_2,V_3,d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1}$$
$$+ \text{higher-order nonlinear terms}$$

$$I_2+\tilde{i}_2 = f_2\left(V_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)+\tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_2\left(v_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s}$$
$$+\tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_2\left(V_s,v_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} +\tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_2\left(V_s,V_1,v_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \quad (2.96)$$
$$+\tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_2\left(V_s,V_1,V_2,v_3,D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} +\tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_2\left(V_s,V_1,V_2,V_3,d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1}$$
$$+ \text{higher-order nonlinear terms}$$

$$I_3+\tilde{i}_3 = f_3\left(V_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)+\tilde{v}_s(t) \left.\frac{\partial f_3\left(v_s,V_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s}$$
$$+\tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_3\left(V_s,v_1,V_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} +\tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_3\left(V_s,V_1,v_2,V_3,D_1\right)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \quad (2.97)$$
$$+\tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_3\left(V_s,V_1,V_2,v_3,D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} +\tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_3\left(V_s,V_1,V_2,V_3,d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1}$$
$$+ \text{higher-order nonlinear terms}$$

กรณีที่ไม่พิจารณาผลการรบกวนของสัญญาณเอซีขนาดเล็ก การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าของแบบจำลองของสวิตซ์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 ได้ตามสมการที่ (2.98) – (2.101)

$$I_s = \frac{V_s}{R_{es}\left(D_1\right)} \quad (2.98)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{e3}\left(D_1\right)} \quad (2.99)$$

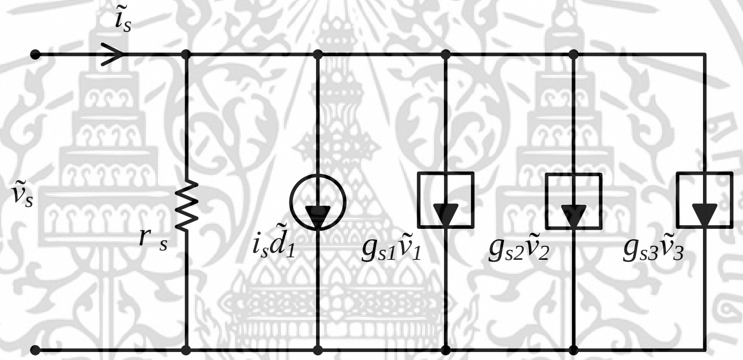
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2 = \frac{V_2}{(1-k)R_{e2}(D_1)} \tag{2.100}$$

$$I_3 = \frac{1}{R_{e1}(D_1)}\frac{V_s^2}{V_3} \tag{2.101}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลการรบกวนของสัญญาณเอซีขนาดเล็ก ทำให้ได้แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของสวิตซ์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 แสดงได้ดังต่อไปนี้

แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่สวิตซ์ SW



รูปที่ 2.8 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่สวิตซ์ SW

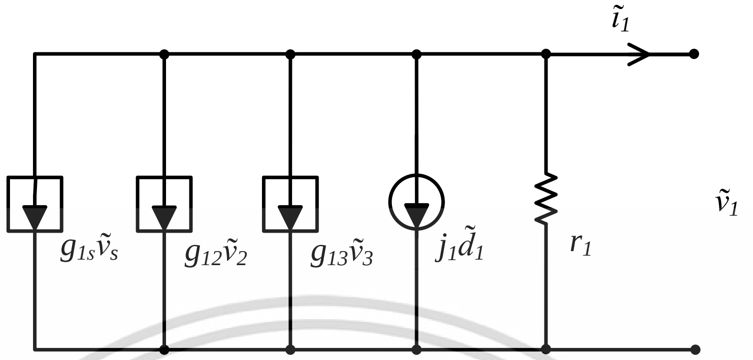
$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{R_{es}(D_1)} \tag{2.102}$$

$$j_s = \frac{2V_g}{R_{es}(D_1)D_1} \tag{2.103}$$

$$g_{s1} = g_{s2} = g_{s3} = 0 \tag{2.104}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_1



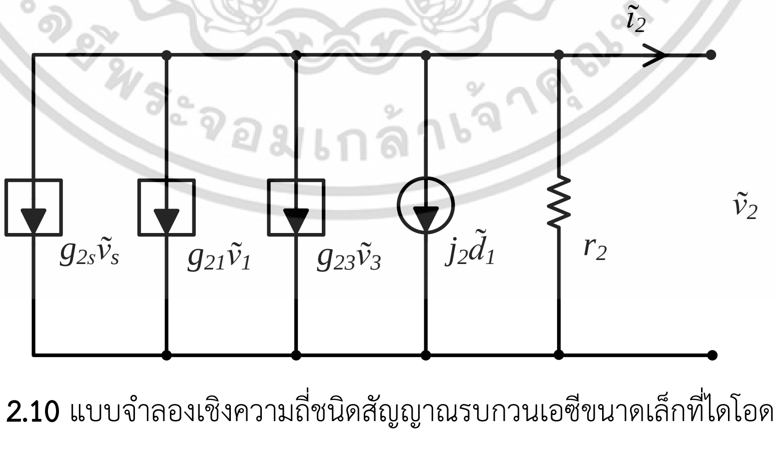
รูปที่ 2.9 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_1

$$\frac{1}{r_1}=\frac{1}{R_{e3}\left(D_1\right)} \tag{2.105}$$

$$j_1=\frac{2V_g}{R_{e2}\left(D_1\right)D_1} \tag{2.106}$$

$$g_{1s}=g_{12}=g_{23}=0 \tag{2.107}$$

แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_2



รูปที่ 2.10 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_2

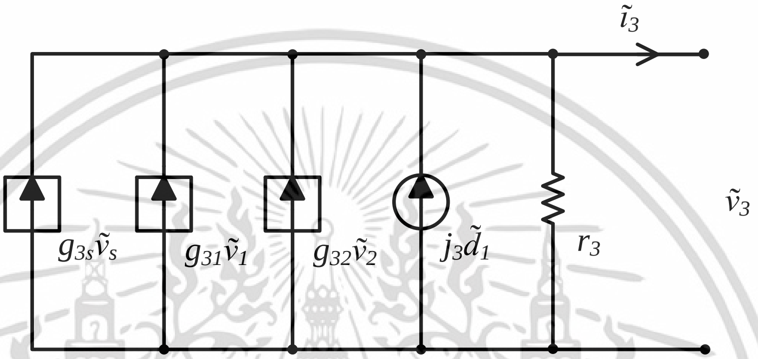
$$\frac{1}{r_2}=\frac{1}{(1-k)R_{e2}\left(D_1\right)} \tag{2.108}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$j_2 = \frac{2V_g}{R_{e2}\left(D_1\right)D_1} \tag{2.109}$$

$$g_{2s} = g_{21} = g_{23} = 0 \tag{2.110}$$

แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_3



รูปที่ 2.11 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กที่ไดโอด D_3

$$\frac{1}{r_3} = -\frac{1}{R_{e1}\left(D_1\right)M\left(D_1\right)^2} \tag{2.111}$$

$$j_3 = \frac{2V_g}{M(D_1)R_{e1}\left(D_1\right)D_1} \tag{2.112}$$

$$g_{3s} = \frac{2}{R_{e1}\left(D_1\right)M\left(D_1\right)}, g_{31} = g_{32} = 0 \tag{2.113}$$

สมการของกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่มีการรบกวนชนิดสัญญาณเอซีขนาดเล็กของสวิตช์ SW ไดโอด D_1, D_2 และ D_3 แสดงดังสมการที่ (2.114) – (2.117) แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงแสดงดังรูปที่ 2.8

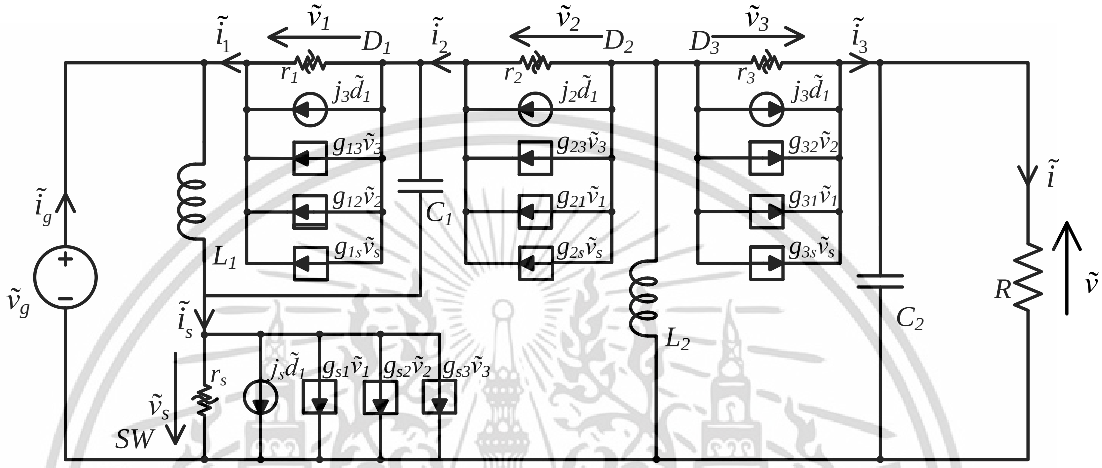
$$\tilde{i}_s = \frac{\tilde{v}_s}{r_s} + g_{s1}\tilde{v}_1 + g_{s2}\tilde{v}_2 + g_{s3}\tilde{v}_3 + j_s\tilde{d}_1 \tag{2.114}$$

$$\tilde{i}_1 = g_{1s}\tilde{v}_s + \frac{\tilde{v}_1}{r_1} + g_{12}\tilde{v}_2 + g_{13}\tilde{v}_3 + j_1\tilde{d}_1 \tag{2.115}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

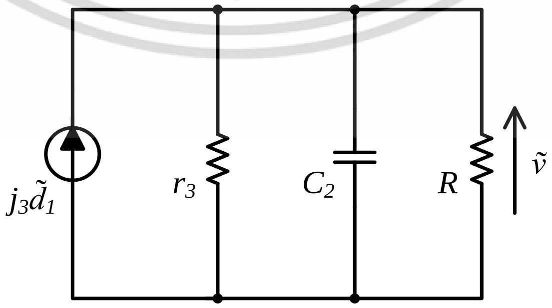
$$\tilde{i}_2 = g_{2s}\tilde{v}_s + g_{21}\tilde{v}_1 + \frac{\tilde{v}_2}{r_2} + g_{23}\tilde{v}_3 + j_2\tilde{d}_1 \quad (2.116)$$

$$\tilde{i}_3 = g_{3s}\tilde{v}_s + g_{31}\tilde{v}_1 + g_{32}\tilde{v}_2 + \frac{\tilde{v}_3}{r_3} + j_3\tilde{d}_1 \quad (2.117)$$



รูปที่ 2.12 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวตามรูปที่ (2.12) เมื่อพิจารณาการทำงานกรณีสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กมีความถี่ต่ำ ทำให้สามารถประมาณได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวเหนี่ยว L_1 และ L_2 มีค่าต่ำมาก ซึ่งสามารถลดรูปแบบจำลองที่ทางด้านออกภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวแสดงดังในรูปที่ 2.13 และสามารถคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกกับดิวตี้ไซเคิลได้ด้วยสมการที่ (2.118)



รูปที่ 2.13 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\tilde{v}}{\tilde{d}_1} = [j_3(R \| r_3)]\left(\frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p}}\right) \tag{2.118}$$

โดยค่า ω_p แสดงดังสมการที่ (2.119)

$$\omega_p = \frac{1}{(R \| r_3)C_2} \tag{2.119}$$

2.4 บทสรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์หลักการทำงาน และวิเคราะห์สมการต่างๆ เพื่อนำไปสู่การออกแบบ และสร้างส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบที่จะนำเสนอในบทที่ 4 ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงเพื่อนำไปใช้ในวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

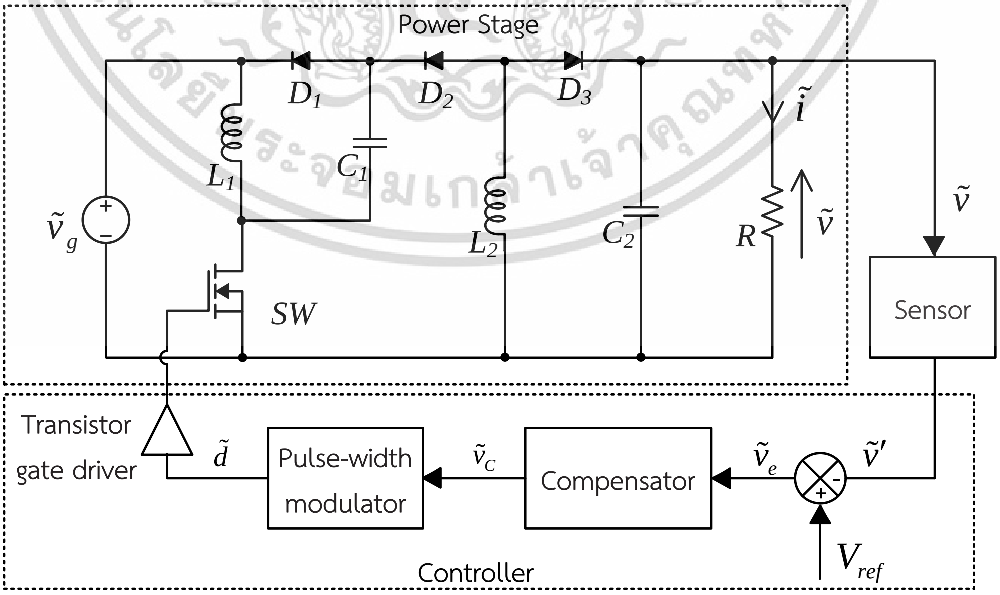
บทที่ 3
การควบคุมดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

3.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ และวิธีการออกแบบระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียว โดยระบบควบคุมที่นำเสนอเป็นระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อก ซึ่งในการวิเคราะห์ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กร่วมกับแบบจำลองเชิงความถี่ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียวที่ได้ผลจากการวิเคราะห์ในบทที่แล้ว โดยการวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าตัวแปรของวงจรชดเชยอนาล็อกใช้วิธี K – Factor

3.2 โครงสร้างการควบคุมดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียว

การควบคุมดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียว มีจุดประสงค์เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้มีค่าคงที่ แม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า และหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟฟ้าตรงที่ทางออกทั้งแบบต่อเนื่องหรือแบบทันทีทันใด ไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียวซึ่งประกอบด้วยส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงและระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.1



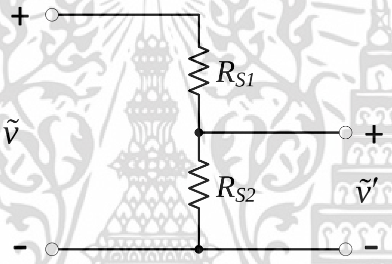
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวและระบบควบคุมประกอบด้วยสามส่วนคือ ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่แล้ว ส่วนเซนเซอร์ (Sensor) ซึ่งทำหน้าที่วัดค่าของแรงดันฟ้าที่ทางออก และส่วนวงจรควบคุม (Controller) ซึ่งประกอบด้วยวงจรชดเชยอนาล็อกและวงจร PWM (Pulse-Width Modulator)

ส่วนเซนเซอร์

ส่วนเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก ($\tilde{v}$) แล้วนำข้อมูลการวัดที่ได้ ($\tilde{v}'$) มาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) โดยเป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกกับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าแสดงดังสมการที่ (3.1)

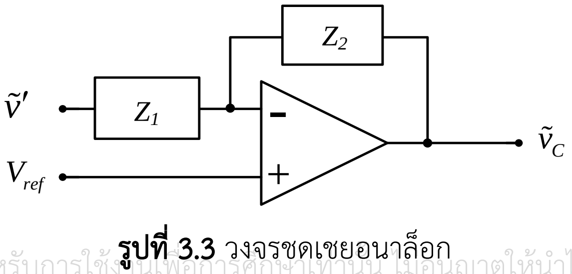


รูปที่ 3.2 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

$$\frac{\tilde{v}'}{\tilde{v}} = \frac{R_{S1}}{R_{S1} + R_{S2}} \quad (3.1)$$

วงจรชดเชยอนาล็อก

ค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้า V_{ref} กับ $\tilde{v}'$ ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดของการทำงานถูกนำมาจัดการด้วยวงจรชดเชยอนาล็อกแสดงดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกกับแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าแสดงดังสมการที่ (3.2)



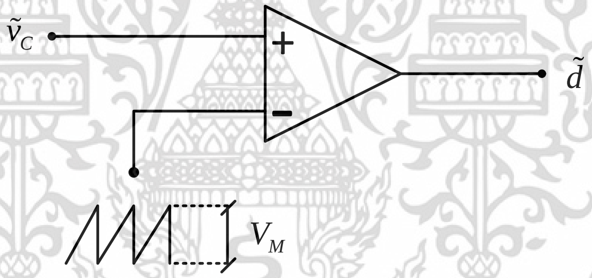
รูปที่ 3.3 วงจรชดเชยอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

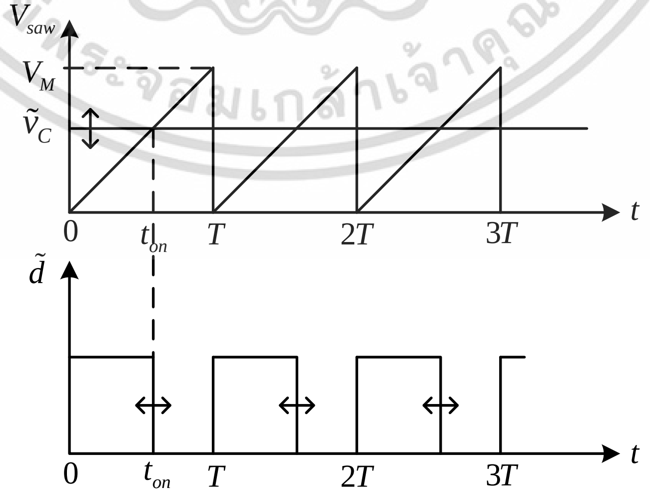
$$\frac{\tilde{v}_C}{\tilde{v}'} = -\frac{Z_2}{Z_1} \tag{3.2}$$

วงจร PWM (Pulse-Width Modulator)

แรงดันไฟฟ้าควบคุม ($\tilde{v}_C$) ที่ได้จากวงจรชดเชยอนาล็อกถูกนำไปใช้ปรับเปลี่ยนค่าของสัญญาณดิวตี้ไซเคิล ($\tilde{d}$) ด้วยเทคนิคควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจร PWM แสดงดังรูปที่ 3.4 วงจรนี้ทำงานโดยนำแรงดันไฟฟ้าควบคุม ($\tilde{v}_C$) มาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าชนิดฟันเลื่อย (V_{saw}) แสดงดังรูปที่ 3.4(ก) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเป็นสัญญาณชนิดพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ในการสวิตซ์ (f_s) และความกว้างของสัญญาณชนิดพัลส์แปรตามแรงดันไฟฟ้าควบคุม ($\tilde{v}_C$) ความกว้างของสัญญาณชนิดพัลส์นี้จึงเป็นตัวแปรที่กำหนดดิวตี้ไซเคิล ($\tilde{d}$) ที่ใช้สำหรับการสั่งการให้มอสเฟตกำลังทำงาน วิธีการสร้างรูปสัญญาณสัญญาณชนิดพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.4(ข) ฟังชั่นถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กระหว่างขนาดดิวตี้ไซเคิล ($\tilde{d}$) กับแรงดันไฟฟ้าควบคุม ($\tilde{v}_C$) แสดงดังสมการที่ (3.3)



(ก) วงจร PWM



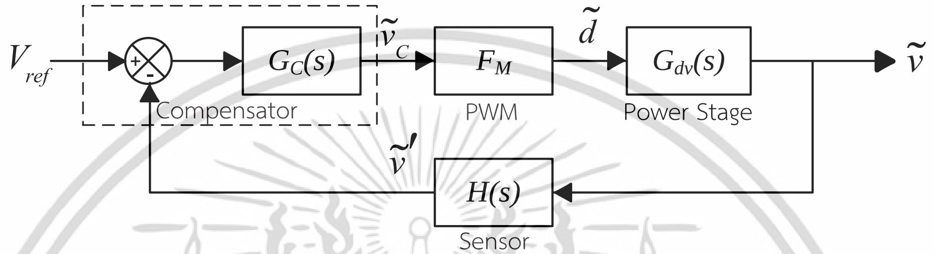
(ข) รูปสัญญาณการทำงานของวงจร PWM

รูปที่ 3.4 วงจร PWM (Pulse-Width Modulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

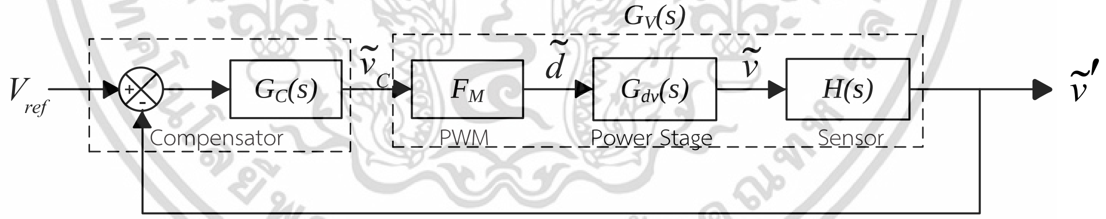
$$\frac{\tilde{d}}{\tilde{v}_C} = \frac{1}{V_M} \tag{3.3}$$

ส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง และระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวที่แสดงดังรูปที่ 3.1 สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว

บล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.5 ถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย (Unity Feedback) ตามรูปที่ 3.6 ซึ่งทำให้ลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์และการออกแบบระบบควบคุม



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบหนึ่งหน่วย

ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงปิด (Closed-loop Transfer Function) ระหว่างค่าของ $\tilde{v}'$ กับ V_{ref} แสดงดังสมการที่ (3.4)

$$\frac{\tilde{v}'}{V_{ref}} = \frac{T(s)}{1+T(s)} \tag{3.4}$$

โดยที่ $T(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงเปิด (Open-loop Transfer Function) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(s) = G_C(s)F_M G_{dv}(s)H(s) = G_C(s)G_V(s) \quad (3.5)$$

3.3 หลักการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อก

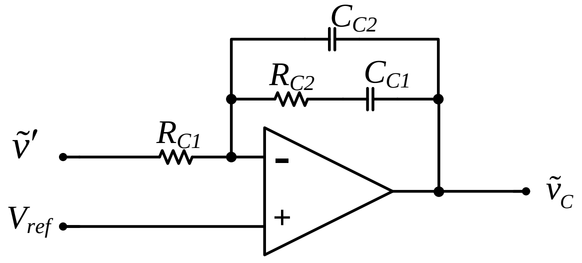
การออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบเชิงความถี่ด้วยเทคนิค Bode Plot ซึ่งมีเงื่อนไขในการออกแบบคือ

1. วงจรชดเชยอนาล็อกต้องทำให้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวมีการทำงานที่มีเสถียรภาพ และมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อการขจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก เช่น กรณีกระแสไฟฟ้าที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกต้องถูกควบคุมให้กลับมามีค่าตามพิกัดได้เร็วที่สุด ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวต้องออกแบบวงจรชดเชยชนิดอนาล็อกซึ่งทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $T(s)$ มีค่าของเฟสมาร์จินไม่น้อยกว่า 45°

2. วงจรชดเชยอนาล็อกต้องทำให้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวมีแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่สภาวะคงตัวเท่ากับพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการ ภายใต้เงื่อนไขนี้ต้องออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกซึ่งทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $T(s)$ มีค่าของขนาดชนิดดีซี $T(0)$ มากที่สุด

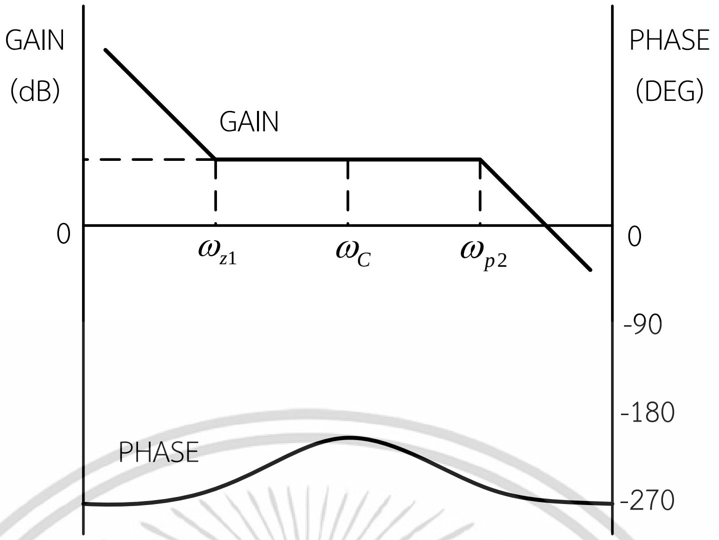
3. วงจรชดเชยอนาล็อกต้องทำให้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนจากภายนอก แต่ในขณะเดียวกันต้องทำให้แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่ทางออก (Output Ripple Voltage) มีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขนี้ต้องออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกซึ่งทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $T(s)$ มีความถี่ครอสโอเวอร์ (Crossover frequency : ω_{co}) มากที่สุดแต่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสวิตช์ $\omega_s = 2\pi f_s$ ($\omega_{co} < \omega_s/2$) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งในสิบของความถี่ในการสวิตช์ ($\omega_{co} < \omega_s/10$)

วงจรชดเชยอนาล็อกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 แสดงดังรูปที่ 3.7(ก) ซึ่งมีคุณสมบัติการตอบสนองเชิงความถี่ทั้งขนาดและมุมเฟส แสดงดังรูปที่3.7(ข) ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 แสดงดังสมการที่ (3.6)



(ก) วงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่

รูปที่ 3.7 วงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2

$$\frac{\tilde{v}_C}{\tilde{v}} = -\frac{s + \dfrac{1}{R_{C2}C_{C1}}}{sR_{C1}C_{C2}\left(s + \dfrac{1}{R_{C2}C_{C2}}\right)} \tag{3.6}$$

วงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 นี้มีโพล (Pole) จำนวนสองตัว คือ p_1 และ p_2 และมีซีโร่ (Zero) จำนวนหนึ่งตัว คือ z_1 โดย p_1 เป็นโพลที่ตำแหน่งจุดกำเนิด (Origin) ส่วนตำแหน่งทางความถี่ของซีโร่ z_1 (ω_{z1}) และโพล p_2 (ω_{p2}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_{C2}C_{C1}} \tag{3.7}$$

$$\omega_{p2} = \frac{C_{C1} + C_{C2}}{R_{C2}C_{C1}C_{C2}} \approx \frac{1}{R_{C2}C_{C2}} \tag{3.8}$$

ผลการตอบสนองเชิงความถี่ชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 แสดงดังในรูปที่ 3.7(ข) สามารถสังเกตได้ว่าที่ความถี่ ω_C ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างความถี่ของซีโร่ z_1 (ω_{z1}) และโพล p_2 (ω_{p2}) มีค่ามุมเฟส θ_C สูงสุด สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ที่ความถี่ ω_C แสดงดังสมการที่ (3.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\tilde{v}_C}{\tilde{v}} = -\frac{j\omega_C + \omega_{z1}}{j\omega_C R_{C1} C_{C2}\left(j\omega_C + \omega_{p2}\right)} \tag{3.9}$$

เมื่อพิจารณากรณีที่ค่าของความถี่ $\omega_{z1} << \omega_C << \omega_{p2}$ สามารถประมาณอัตราขยายที่ความถี่ ω_C ของได้ดังสมการที่ (3.10) และค่าขนาดของมุมเฟส θ_C ดังสมการที่ (3.12) โดยในสมการนี้ค่ามุมเฟส -180° และค่ามุมเฟส -90° เป็นผลมาจากคุณสมบัติของระบบควบคุมป้อนกลับแบบลบและเป็นผลมาจากโพล p_1 ที่ตำแหน่งจุดกำเนิดตามลำดับ

$$\frac{\tilde{v}_C}{\tilde{v}} \approx -\frac{j\omega_C}{j\omega_C R_{C1} C_{C2}\left(\omega_{p2}\right)} = -\frac{1}{R_{C1} C_{C2}\left(\frac{1}{R_{C2} C_{C2}}\right)} = -\frac{R_{C2}}{R_{C1}} \tag{3.10}$$

$$\theta_C = -180° - 90° + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_C}{\omega_{z1}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_C}{\omega_{p2}}\right) \tag{3.11}$$

การคำนวณค่าตำแหน่งความถี่ของซีโร่ z_1 (ω_{z1}) และโพล p_2 (ω_{p2}) ในงานวิจัยใช้การคำนวณด้วยวิธี K – Factor ซึ่งกำหนดตำแหน่งความถี่ของซีโร่ z_1 (ω_{z1}) และโพล p_2 (ω_{p2}) ตามสมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ มุมเฟส θ_C ที่ตำแหน่งความถี่ ω_C สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14)

$$\omega_{z1} = \frac{\omega_C}{K} \tag{3.12}$$

$$\omega_{p2} = \omega_C K \tag{3.13}$$

$$\theta_C = -270° + \tan^{-1}\left(K\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{K}\right) \tag{3.14}$$

สมการ (3.14) สามารถจัดรูปเป็นสมการ (3.16) ได้โดยการใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติตามสมการที่ (3.15)

$$\tan^{-1}\left(K\right) + \tan^{-1}\left(\frac{1}{K}\right) = 90° \tag{3.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_C = 2\tan^{-1}(K) - 360° = 2\tan^{-1}(K) \quad (3.16)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟส θ_C ของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ตำแหน่งความถี่ ω_C กับค่า K - Factor แสดงดังสมการที่ (3.17) ซึ่งมุมเฟส θ_C มีค่าตั้งแต่ 0° ถึง 180° เมื่อค่า K - Factor มีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงค่าอนันต์ $(0 < K < \infty)$

$$K = \tan\left(\frac{\theta_C}{2}\right) \quad (3.17)$$

ในขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว ซึ่งเมื่อคำนวณค่าความถี่ครอสโอเวอร์ (ω_{co}) ของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่วงเปิด $T(s)$ และกำหนดขนาดของมุมเฟสมาร์จินที่ต้องการที่ความถี่นั้นซึ่งทำให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานมีเสถียรภาพ ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณค่ามุมเฟส θ_C ของวงจรชดเชยอนาล็อกเพื่อทำให้ค่ามุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่วงเปิด $T(s)$ เป็นไปตามที่ต้องการ ค่ามุมเฟสชดเชยนี้คำนวณได้จากมุมเฟสมาร์จินที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่วงเปิด $T(s)$ และค่ามุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ของ $G_V(s)$ ซึ่งผลการคำนวณที่ได้ทำให้สามารถคำนวณค่าของ K – Factor ได้จากสมการที่ (3.17) และสามารถคำนวณค่าตำแหน่งความถี่ของซีโร่ z_1 (ω_{z1}) ค่าตำแหน่งความถี่ของโพล p_2 (ω_{p2}) ค่าขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{C1} และ C_{C2} ของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ได้ตามสมการที่ (3.18) (3.19) (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ

$$\omega_{z1} = \frac{\omega_C}{K} = \frac{1}{R_{C2}C_{C1}} \quad (3.18)$$

$$\omega_{p2} = K\omega_C = \frac{1}{R_{C2}C_{C2}} \quad (3.19)$$

$$C_{C1} = \frac{K}{\omega_C R_{C2}} = \frac{1}{2\pi f_C R_{C2}} \quad (3.20)$$

$$C_{C2} = \frac{1}{K\omega_C R_{C2}} = \frac{1}{K2\pi f_C R_{C2}} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 บทสรุป

บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบควบคุมของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว โดยนำเสนอระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อกซึ่งใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็ก และได้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ด้วยเทคนิคแผนภาพโบด (Bode Plot) ซึ่งระบบควบคุมที่ได้สามารถควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ที่พิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามต้องการ ในบทต่อไปเป็นการนำผลการศึกษาส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าในบทที่ 2 และผลการศึกษาของส่วนระบบควบคุมในบทนี้มาออกแบบและสร้างดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบและสร้างดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ ตามผลการวิเคราะห์ในบทที่ 2 และ 3 โดยแบ่งการนำเสนอเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอการออกแบบ การคำนวณ และการจำลองผลการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม PSpice™ ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณวงจรชดเชยชนิดอนาล็อก Type 2 ของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB®

4.2 การออกแบบและการจำลองผลการทำงานของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

บทย่อยนี้แสดงขั้นตอนการสร้างส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงเพื่อให้ได้ตามพิกัดทางไฟฟ้า โดยประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ การออกแบบและคำนวณค่าอุปกรณ์ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ส่วนที่สองเป็นการจำลองการทำงานของผลการออกแบบที่ได้ด้วยโปรแกรม PSpice™ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 การออกแบบส่วนส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

ข้อกำหนดพิกัดทางไฟฟ้า (Electrical Specification) ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว คือ

- แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า $V_g = 20\text{-}120\text{V}$
- แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก $V = 18\text{V}$
- กำลังไฟฟ้าที่ทางออก $P_{out} = 3\text{W}$
- ความถี่สวิตซ์ $f_S = 100\text{kHz}$
- ประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 60% $\eta > 60\%$
- ค่าแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่ทางออกสูงสุด $\Delta v = 0.02V$

ขั้นตอนการออกแบบมีดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดจากสมการที่ (2.33)) โดยค่าของ $V_{g,min}$ =20V และ V =18V

$$D_{1,max} = \frac{1}{1+\sqrt{\frac{V_{g,min}}{V}}} = \frac{1}{1+\sqrt{\frac{20}{18}}} = 0.486 \qquad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คำนวณค่าคาบเวลาการสวิตซ์ T_s จากสมการที่ (2.34) โดยความถี่สวิตซ์ f_s =100kHz

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{100\times10^3} = 10\mu s \tag{4.2}$$

3. คำนวณค่าคาบเวลาการสวิตซ์สูงสุด ($T_{on,max}$) จากสมการที่ (2.35)

$$T_{on,max} = D_{1,max}T_s = 0.486\times10\times10^{-6} = 4.86\mu s \tag{4.3}$$

4. คำนวณค่าคาบเวลาการสวิตซ์ต่ำสุด ($T_{off,min}$) จากสมการที่ (2.36)

$$T_{off,min} = T_s - T_{on,max} = 10\mu s - 4.86\mu s = 5.14\mu s \tag{4.4}$$

5. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ทางเข้าจากสมการที่ (2.37)

$$P_{in,max} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{3}{0.6} = 5W \tag{4.5}$$

6. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ทางเข้าจากสมการที่ (2.38)

$$I_{g,max} = \frac{P_{in,max}}{V_{g,min}} = \frac{5}{20} = 0.25A \tag{4.6}$$

7. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำ L_1 จากสมการที่ (2.39)

$$I_{L1P} = 2\frac{I_{g,max}}{D_{1,max}} = 2\times\frac{0.25}{0.486} = 1.028A \tag{4.7}$$

8. คำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 จากสมการที่ (2.40)

$$L_1 = \frac{V_{g,min}T_{on,max}}{I_{L1P}} = \frac{20\times4.86\times10^{-6}}{1.028} = 94.552\mu H \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 จากสมการที่ (2.41) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของวงจรสอง

$$V_{C1} = V_{g,min}\frac{T_{on,max}}{T_{off,min}} = 20\times\frac{4.86\times10^{-6}}{5.14\times10^{-6}} = 18.91\text{V} \quad (4.9)$$

10. คำนวณค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 จากสมการที่ (2.42) โดยการประมาณค่าของแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม $\Delta v_{C1} = 10\%V_{C1}$

$$C_1 = \frac{\Delta i_{L1}T_s}{8\Delta v_{C1}} = \frac{i_{L1,max}T_s}{8\times10\%V_{C_1}} = \frac{1.028\times10\times10^{-6}}{8\times0.1\times18.91} = 679.5\text{nF} \quad (4.10)$$

11. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำ L_2 จากสมการที่ (2.43)

$$I_{L2P} = \frac{2}{1-D_{1,max}}\frac{P_{out}}{V} = \frac{2}{1\text{-}0.486}\times\frac{3}{18} = 0.6485\text{A} \quad (4.11)$$

12. คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2 จากสมการที่ (2.44)

$$L_2 = V_{C1}\frac{T_{on,max}}{I_{L2P}} = \frac{18.91\times4.86\times10^{-6}}{1.297} = 141.72\mu\text{H} \quad (4.12)$$

13. คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ C_2 จากสมการที่ (2.45)

$$V_{C2} = V_{C1}\frac{D_{1,max}}{1-D_{1,max}} = 18.91\times\frac{0.486}{1\text{-}0.486} = 17.879\text{V} \quad (4.13)$$

14. คำนวณค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2 จากสมการที่ (2.46) โดยการประมาณค่าของแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม $\Delta v = 2\%V$

$$C_2 = \frac{\Delta i_{L2}T_s}{8\Delta v} = \frac{i_{L2,max}T_s}{8\times2\%V} = \frac{1.297\times10\times10^{-6}}{8\times0.02\times17.879} = 4.5339\mu\text{F} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

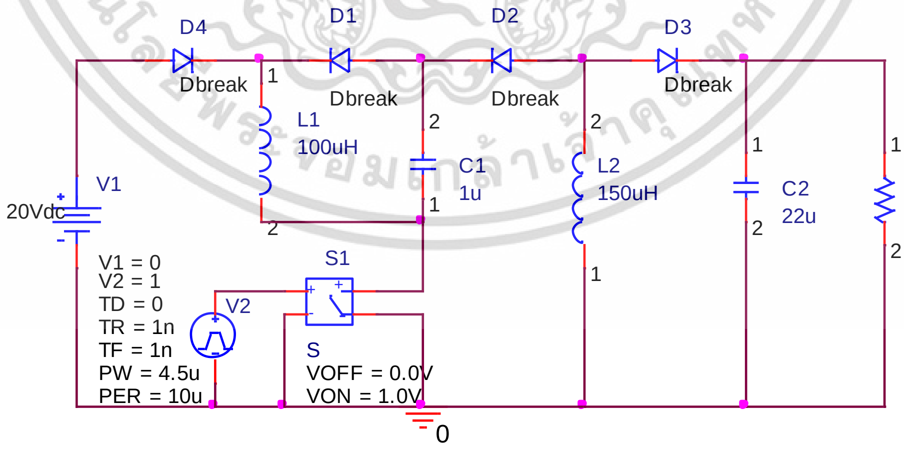
เนื่องจากงานวิจัยนี้ถูกกำหนดให้เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีผลิตขายทั่วไปและจัดหาได้ง่าย ผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณคือ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 =100μH, L_2 =150μH และค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1 =1μF, C_2 =22μF

4.2.2 การจำลองการทำงานของส่วนจ่ายกำลัง

ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่ถูกออกแบบแล้วถูกนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice™ เพื่อยืนยันความถูกต้อง ในการจำลองนี้ได้จำลองการทำงานที่พิกัดโหลด ซึ่งค่าโหลดความต้านทาน R คำนวณจากพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดและจากสมการที่ (4.15)

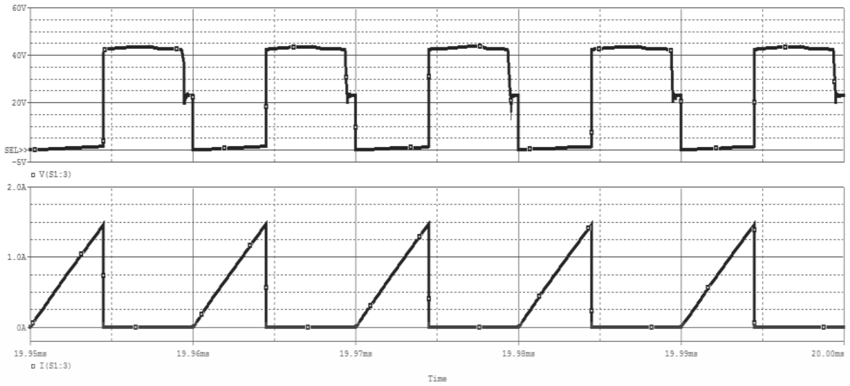
$$R = \frac{V^2}{P_{out}} = \frac{18^2}{3} = 108 \qquad (4.15)$$

โดยเลือกใช้จริงที่ค่าโหลดความต้านทาน $R = 120\Omega$ ค่าอุปกรณ์ในวงจรที่เลือกใช้จริงคือตัวเหนี่ยวนำ $L_1 = 100\mu\text{H}$, $L_2 = 150\mu\text{H}$ และค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_1 = 1\mu\text{F}$, $C_2 = 22\mu\text{F}$ แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 20 V ดิวตี้ไซเคิลมีค่า 0.45 Schematic ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรแสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.9



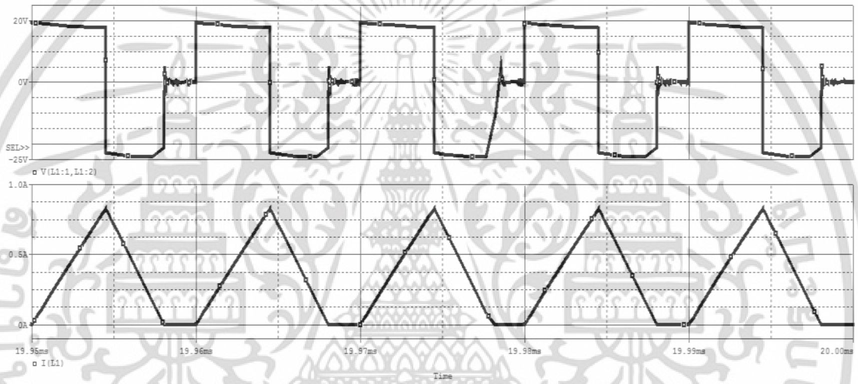
รูปที่ 4.1 Schematic ของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice™

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



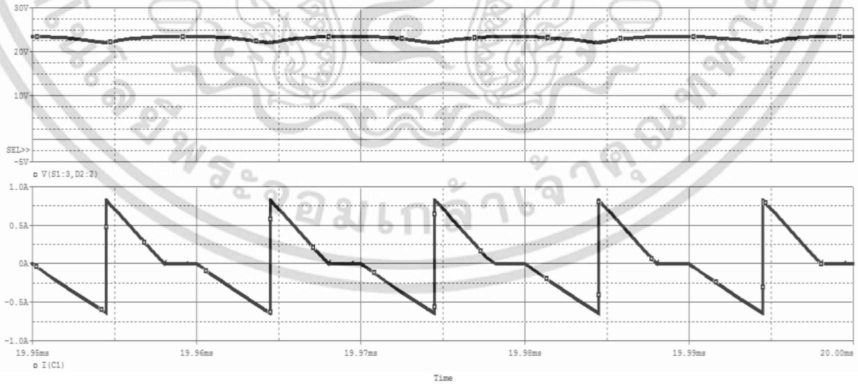
รูปบน : v_s (5V/div) , รูปล่าง : i_s (0.125A/div) แกนเวลา 10μs/div

รูปที่ 4.2 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์ SW



รูปบน : v_{L1} (5V/div) , รูปล่าง : i_{L1} (0.125A/div) แกนเวลา 10μs/div

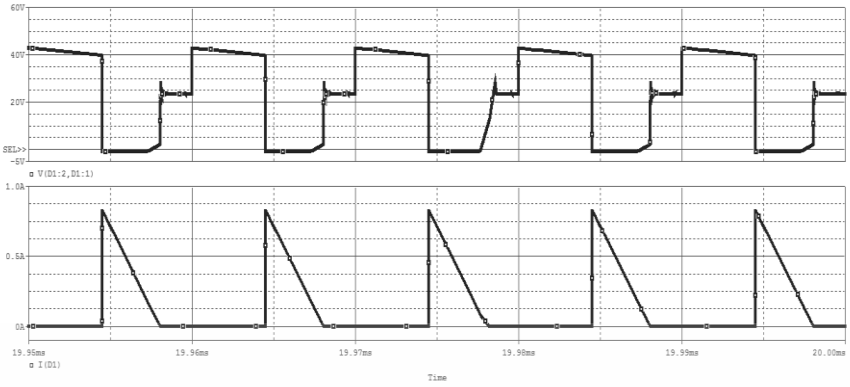
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำสวิตช์ L_1



รูปบน : v_{C1} (2.5V/div) , รูปล่าง : i_{C1} (0. 25A/div) แกนเวลา 10μs/div

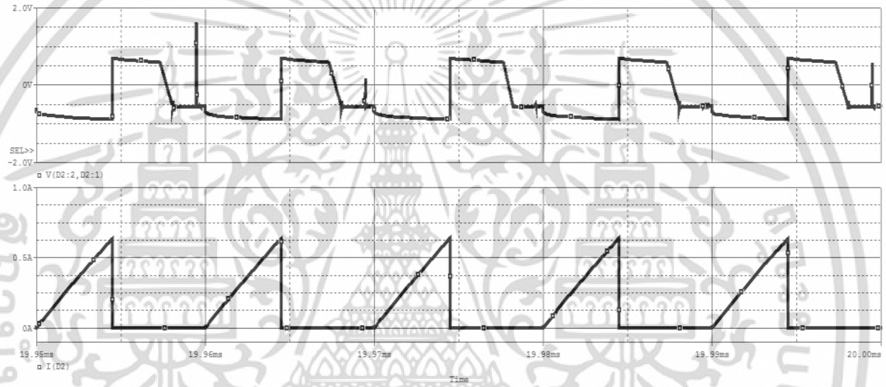
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



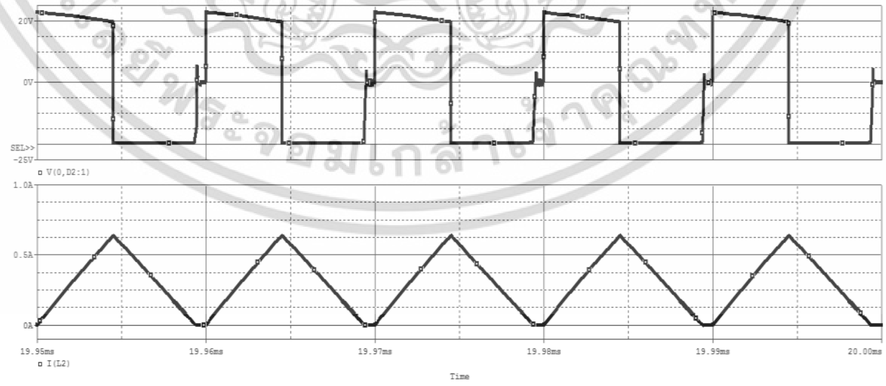
รูปบน : v_1(5V/div) , รูปล่าง : i_1(0.125A/div) แกนเวลา 10μs/div

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1



รูปบน : v_2(0.5V/div) , รูปล่าง : i_2 (0.125A/div) แกนเวลา 10μs/div

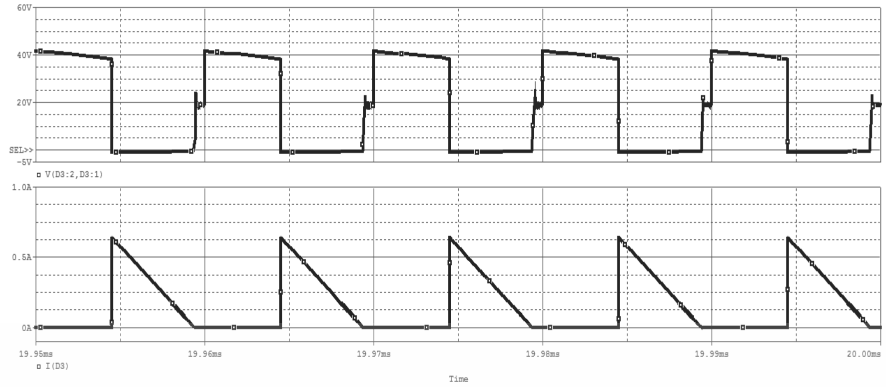
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2



รูปบน : v_{L2}(5V/div) , รูปล่าง : i_{L2}(0.125A/div) แกนเวลา 10μs/div

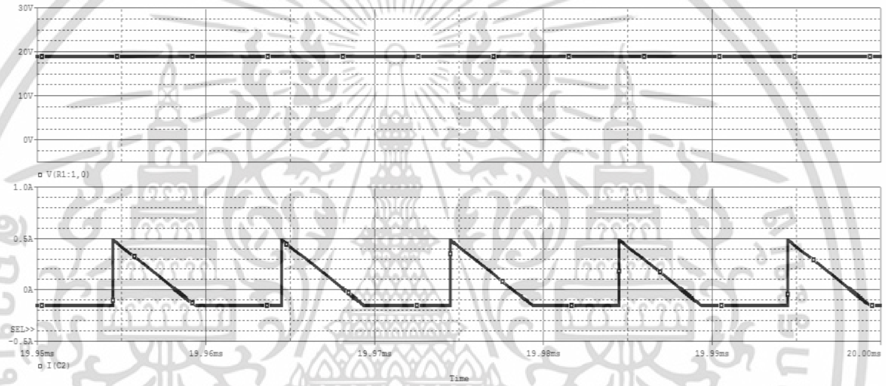
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปบน : v_3 (5V/div) , รูปล่าง : i_3 (0.125A/div) แกนเวลา 10µs/div

รูปที่ 4.8 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_3

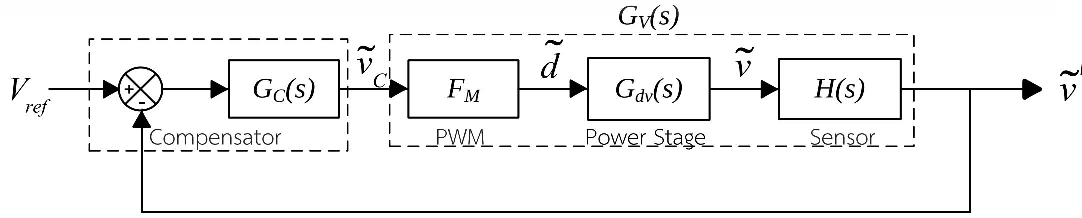


รูปบน : v_{C2} (2.5V/div) , รูปล่าง : i_{C2} (0.125A/div) แกนเวลา 10µs/div

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2

4.3 การออกแบบระบบควบคุม

บล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงเปิด $T(s)$ แสดงดังสมการที่ (4.16)



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนชนิดเอซีขนาดเล็กของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(s) = G_C(s)F_M G_{dv}(s)H(s) = G_C(s)G_V(s) \tag{4.16}$$

เมื่อนำค่าของ j_3 และ ω_p จากสมการที่ (2.112) และ (2.119) แทนค่าลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง $G_{dv}(s)$ ตามสมการที่ (2.118) ได้สมการที่ (4.16)

$$\frac{\tilde{v}}{\tilde{d}_1} = \left(\frac{V_g{}^2 D_1 T_s}{V_o L_1}\right)\left(\frac{Rr_3}{R + r_3 + sC_2 Rr_3}\right) \tag{4.17}$$

โดยค่า r_3 คำนวณจากสมการที่จากสมการที่ (2.111) และข้อมูลของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงที่ได้ออกแบบแล้วในตอนต้น ซึ่งคำนวณได้ r_3 =69Ω ค่าโหลดความต้านทาน R คำนวณจากพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดและจากสมการที่ (4.15) ซึ่งเลือกใช้ค่าโหลดความต้านทาน R =120Ω ในการออกแบบ ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า V_g ถูกกำหนดเป็นค่าที่ต่ำสุดจากพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง ($G_{dv}(s)$) ตามสมการที่ (4.18)

$$\frac{\tilde{v}}{\tilde{d}_1} = \left(\frac{45.2736}{1 + 922.24\times10^{-6} s}\right) \tag{4.18}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงจร PWM (F_M) คำนวณได้จากสมการที่ (4.19) เมื่อ V_M เป็นความสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าชนิดฟันเลื่อยซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.96V

$$\frac{\tilde{d}_1}{\tilde{v}_C} = \frac{1}{V_M} = \frac{1}{1.96} \tag{4.19}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงจรเซนเซอร์ ($H(s)$) คำนวณได้จากสมการที่ (4.20)

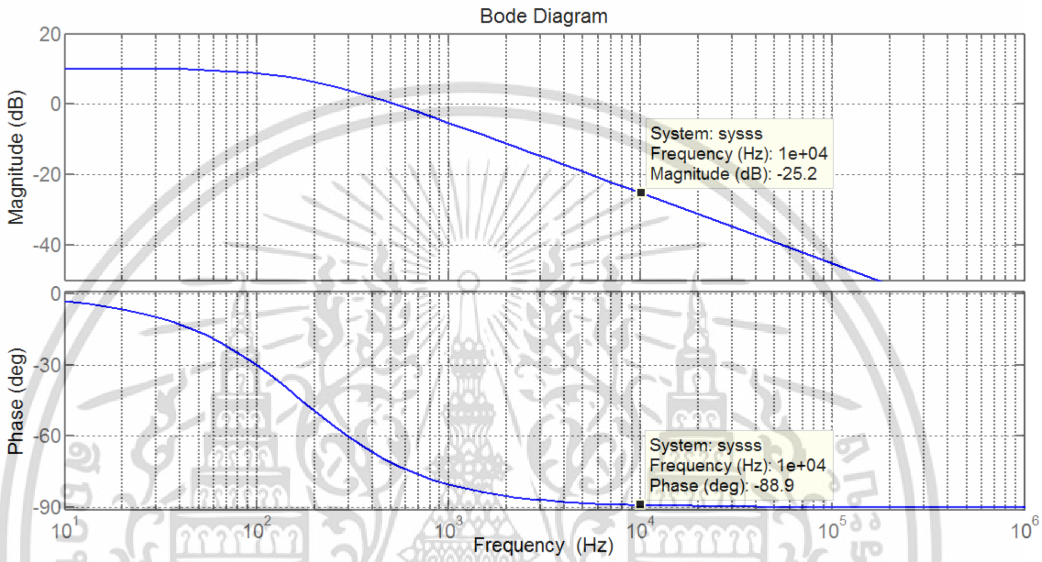
$$\frac{\tilde{v}'}{\tilde{v}} = \frac{2.5}{18} \tag{4.20}$$

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของวงเปิด ($G_V(s)$) คำนวณได้ดังสมการที่ (4.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_V(s) = F_M G_{dv}(s) H(s) = \frac{3.2082}{1 + 922.24 \times 10^{-6} s} \qquad (4.21)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.21) มาแสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB® แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิง $G_V(s)$

การออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 คำนวณจากผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_V(s)$ ตามรูปที่ 4.11 และเงื่อนไขการออกแบบที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบมีดังต่อไปนี้คือ

1. กำหนดค่าความถี่ครอสโอเวอร์ $f_{co} = 0.1 f_s$ คือ 10kHz
2. คำนวณอัตราขยายของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz โดยคำนวณได้จากการวัดอัตราขยาย (dB) จากผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_V(s)$ ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งผลการวัดอัตราขยาย (dB) ได้ค่าเท่ากับ -25.2dB และวัดมุมเฟสที่ความถี่นี้ได้เท่ากับ -88.9° ดังนั้นอัตราขยาย (dB) ของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz ต้องมีค่าเท่ากับ 25.2dB เพื่อทำให้อัตราขยายของฟังชั่นถ่ายโอนวงเปิด $T(s)$ หรือ $G_C(s)G_V(s)$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการคำนวณค่าอัตราขยายของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$25.2dB = 20\log\left(\frac{\tilde{v}}{\tilde{v}_C}\right) \tag{4.22}$$

$$\frac{\tilde{v}}{\tilde{v}_C} = 10^{25.2/20} = 18.19 \tag{4.23}$$

3. คำนวณค่าความต้านทาน R_{C1} และ R_{C2} โดยคำนวณจากค่าคำนวณอัตราขยายของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz ซึ่งคำนวณได้จากข้อที่แล้วและจากสมการที่ (3.10) ถ้ากำหนดให้ค่าของ $R_{C1} = 10\text{k}\Omega$ คำนวณค่าของ R_{C2} ได้ดังนี้คือ

$$\frac{R_{C2}}{R_{C1}} = 18.19 \tag{4.24}$$

$$R_{C2} = 181.9\times10^{3}\Omega \tag{4.25}$$

4. คำนวณค่ามุมเฟสของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 (θ_C) ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ 10kHz ด้วยสมการที่ (4.26) โดยใช้ข้อมูลจากจากมุมเฟสของ $G_V(s)$ (-88.9°) ที่วัดได้จากรูปที่ 4.11 และต้องทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด $T(s)$ มีค่าของเฟสมาร์จินไม่น้อยกว่า 45°

$$\theta_C = \theta_{phasemargin} - \theta_{converter} = 45^{\circ} - (-88.9^{\circ}) = 133.9^{\circ} \tag{4.26}$$

5. คำนวณค่าของ K – Factor ได้จากสมการที่ (3.17)

$$K = \tan\left(\frac{133.9}{2}\right) = 2.35 \tag{4.27}$$

6. คำนวณค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_{C1} และ C_{C2} ได้จากสมการที่ (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ

$$C_{C1} = \frac{2.35}{2\pi\left(10\times10^{3}\right)\left(181.9\times10^{3}\right)} = 205.61\times10^{-12} \tag{4.28}$$

$$C_{C2} = \frac{1}{(2.35)\,2\pi\left(10\times10^{3}\right)\left(181.9\times10^{3}\right)} = 37.2\times10^{-12} \tag{4.29}$$

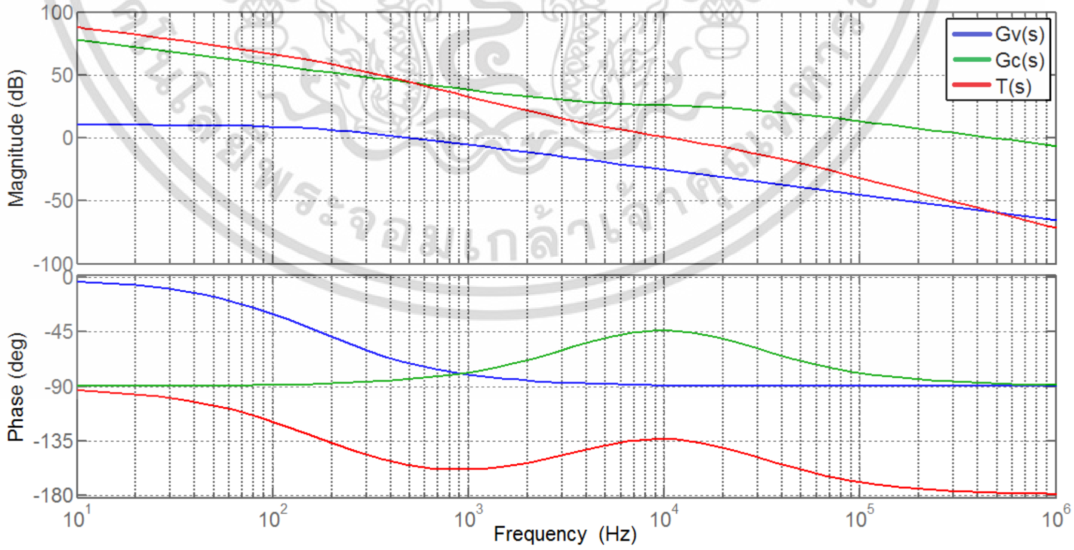
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการออกแบบวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ด้วยเทคนิค K – Factor ผู้วิจัยได้เลือกค่าอุปกรณ์ที่ใช้จริงคือ R_{C1} =10kΩ, R_{C2} =200kΩ, C_{C1} =200μF และ C_{C2} =33μF ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ของ $G_C(s)$ แสดงดังสมการที่ (4.30) และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กวงเปิด $T(s)$ ของดีซี – ดีซีคาสเคด ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบตามสมการที่ (4.31)

$$G_C(s) = \frac{s + 25000}{330 \times 10^{-9} s (s + 151515.1515)} \tag{4.30}$$

$$T(s) = G_V(s) G_C(s) = \frac{10.542 \times 10^9 s + 263.55 \times 10^{12}}{s^3 + 152.61 \times 10^3 s^2 + 164.31 \times 10^6} \tag{4.31}$$

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของ $G_V(s)$, $G_C(s)$ และ $T(s)$ แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสังเกตได้ว่าวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ที่ได้ออกแบบทำให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเชิงความถี่วงเปิด $T(s)$ ตามสมการที่ (4.31) โดยมีความถี่ครอสโอเวอร์ที่ 10.8kHz มีค่าดีซีเกนสูง และมีเฟสมาร์จินที่ 46.6° ซึ่งสามารถทำให้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นทำงานได้มีเสถียรภาพ และสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_V(s)$, $G_C(s)$ และ $T(s)$

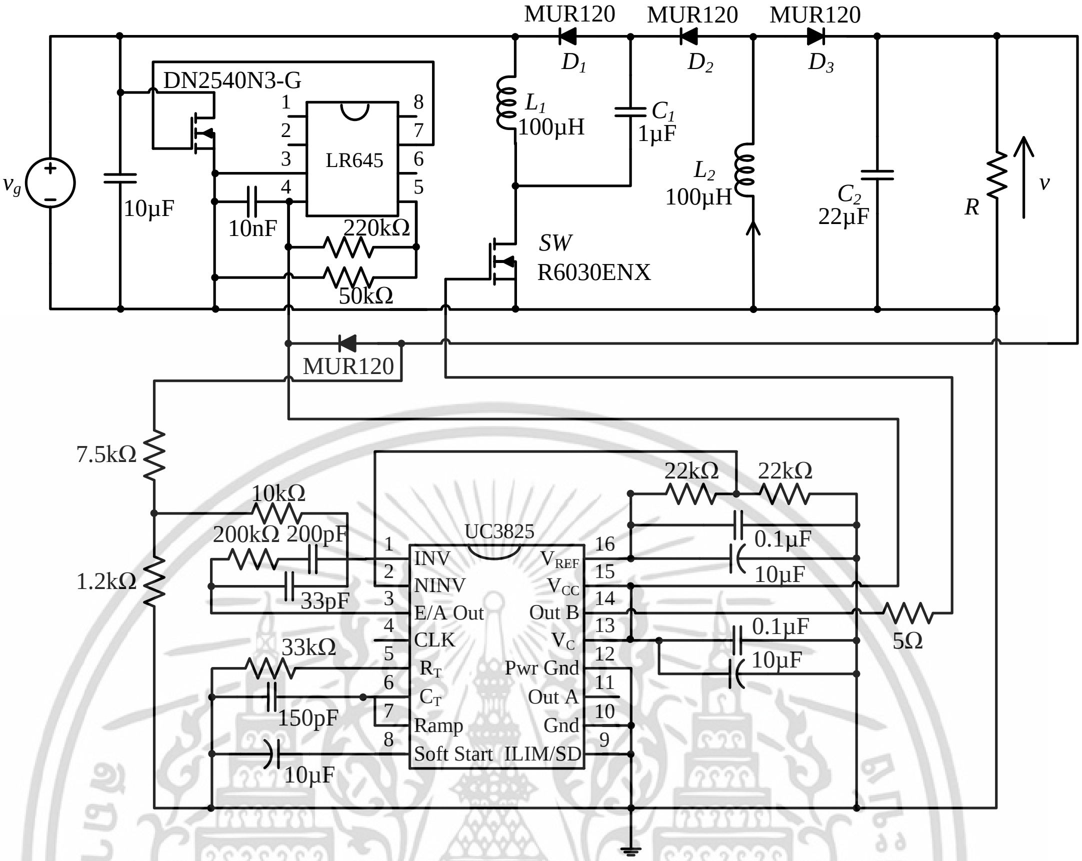
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงรายการอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบแสดงดังในรูปที่ 4.13 โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกป้อนกลับผ่านชุดความต้านทานแบ่งแรงดัน (Resistive voltage divider) ไปยังไอซีควบคุม UC3825 ซึ่งต่อวงจรให้ทำงานควบคุมในโหมดแรงดัน (Voltage Mode Control) ภายในไอซีมีตัวขยายความผิดพลาด (Error Amplifier) ที่ใช้สร้างวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 โดยนำค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่คำนวณได้มาต่ออยู่ระหว่างขา 1 และ 3 ของไอซี และมีสัญญาณเอาท์พุท PWM ที่ขา 11 และ 14 ซึ่งกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลที่ถูกนำไปขับเกทของสวิทช์มอสเฟต ส่วนรูปที่ 4.14 แสดงดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่สร้างขึ้น และรูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว ที่จะอยู่บนแผ่นวงจรของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลัก

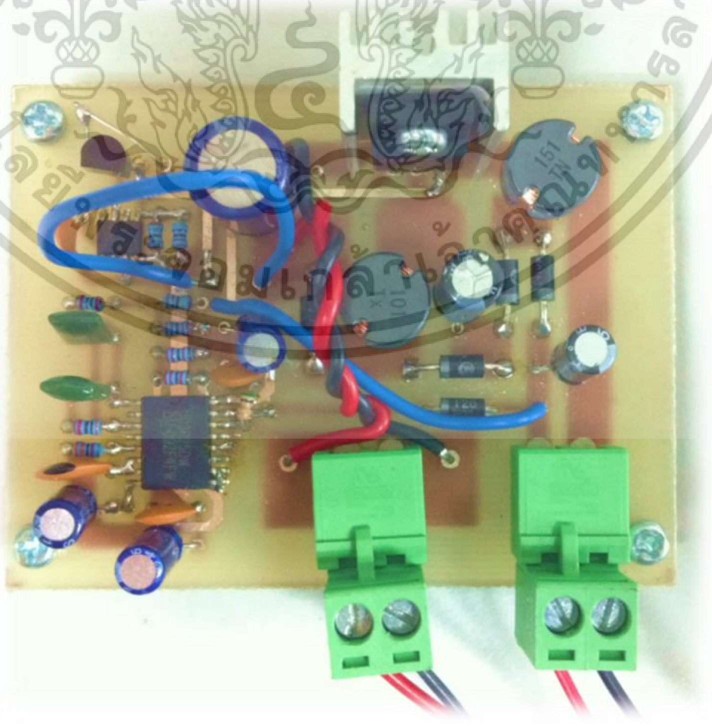
ตารางที่ 4.1 รายการอุปกรณ์ในดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ

พารามิเตอร์	ค่า
L_1	100µH
L_2	150µH
C_1	1µF
C_2	22µF
D_1, D_2, D_3	MUR120RLG
MOSFET	R6030ENX
PWM Controller IC	UC3825DW
R_{C1}	10kΩ
R_{C2}	200kΩ
C_{C1}	200µF
C_{C2}	33µF
Linear Voltage Regulator	LR645LG-G
Depletion Mode MOSFET	DN2540N3-G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

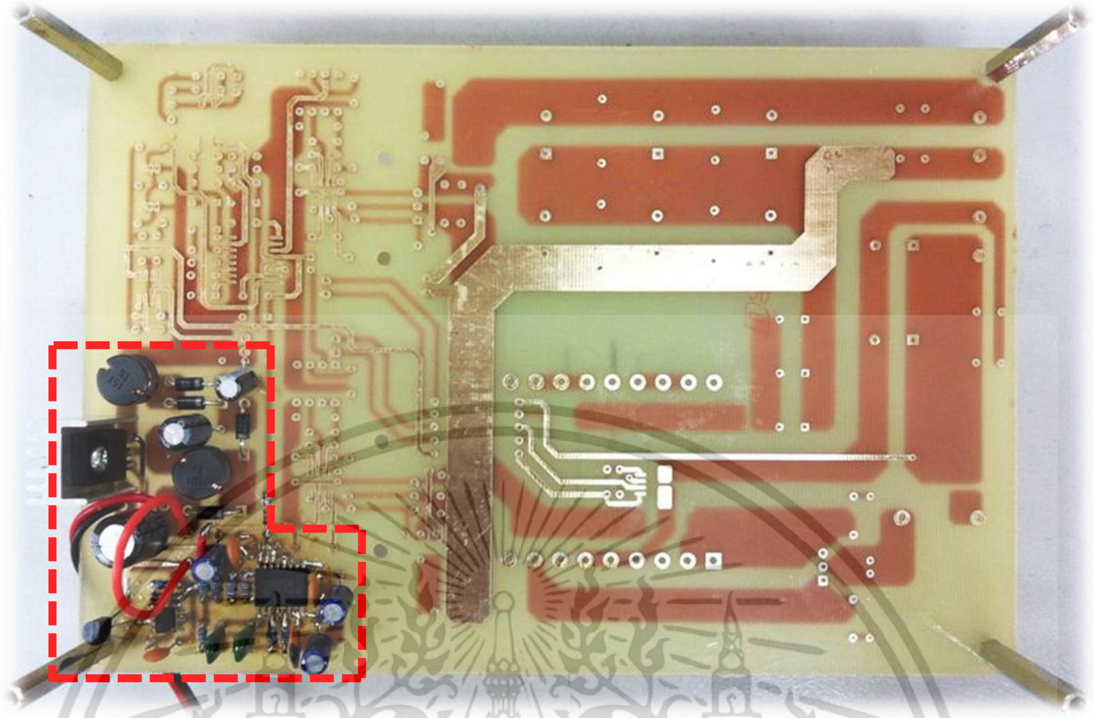


รูปที่ 4.13 Schematic ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ



รูปที่ 4.14 ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่นำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์หลัก

4.4 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบ และสร้างส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ และนำผลการออกแบบที่ได้มาจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องด้วย โปรแกรม PSpice™ หลังจากนั้นเป็นการออกแบบ การวิเคราะห์และการคำนวณค่าของข้อมูลต่างๆ ของวงจรชดเชยอนาล็อกชนิด Type 2 ของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB® ซึ่งผลของการออกแบบและสร้างทั้งส่วนทำให้ได้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ ซึ่งจะนำไปทดสอบการทำงานในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลองการทำงานดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสี่กรณีคือ กรณีแรกเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวในคอนเวอร์เตอร์แบบต้นแบบ กรณีที่สองเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะคงตัวเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้คงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า และหรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออก กรณีที่สามเป็นการเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะพลวัตเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้คงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดของกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออก และกรณีสุดท้ายเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

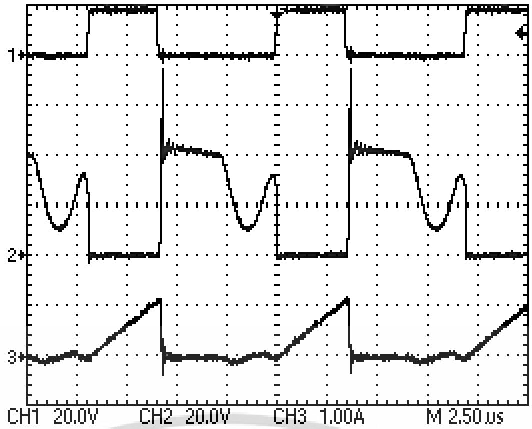
การทดลองเพื่อตรวจสอบดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่สร้างขึ้น ได้ใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้คือ

1. DC Power Supply ของ MRPs รุ่น DCS-3302D จำนวน 2 เครื่อง
2. Digital Storage Oscilloscope ของ Tektronix รุ่น TDS2024C จำนวน 1 เครื่อง
3. Digital Multi meter ของ FLUKE รุ่น 179 จำนวน 2 เครื่อง
4. Differential Probe ของ YOKOGAWA รุ่น 700925 จำนวน 1 เครื่อง
5. Current Probe ของ AGILENT TECHNOLOGIES รุ่น N2782B จำนวน 1 เครื่อง

5.3 การทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์

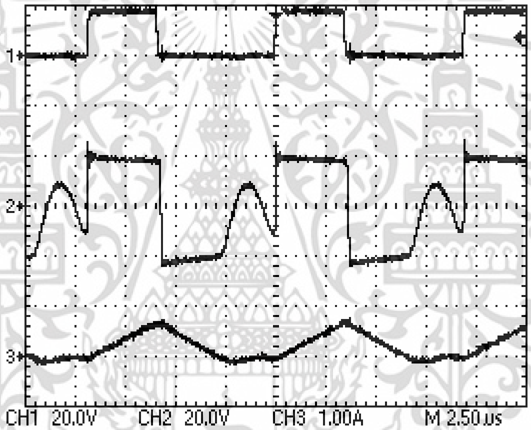
การทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ เป็นการทดลองเพื่อสังเกตความถูกต้องในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวในคอนเวอร์เตอร์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า 20V และค่าขนาดโหลดความต้านทาน R ที่ทางออก 17% ของพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการ ผลการทดลองดังกล่าวของอุปกรณ์แต่ละตัวแสดงดังในรูปที่ (5.1) – (5.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



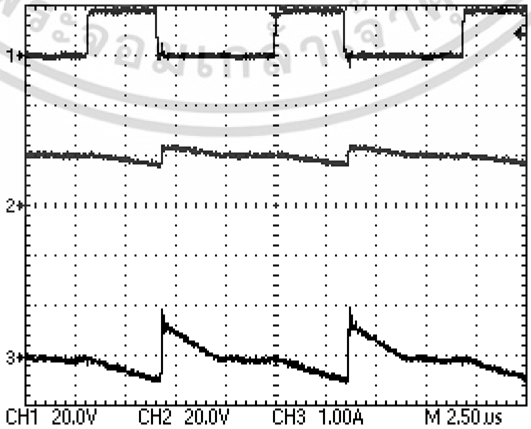
รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_s , รูปล่าง : i_s

รูปที่ 5.1 รูปสัญญาณของแรงดันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สวิตซ์ SW (MOSFET)



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_{L1} , รูปล่าง : i_{L1}

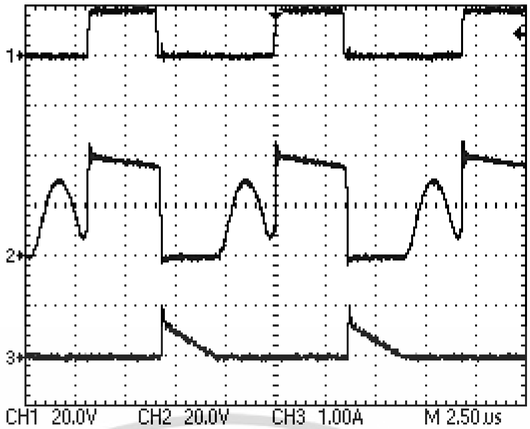
รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_{C1} , รูปล่าง : i_{C1}

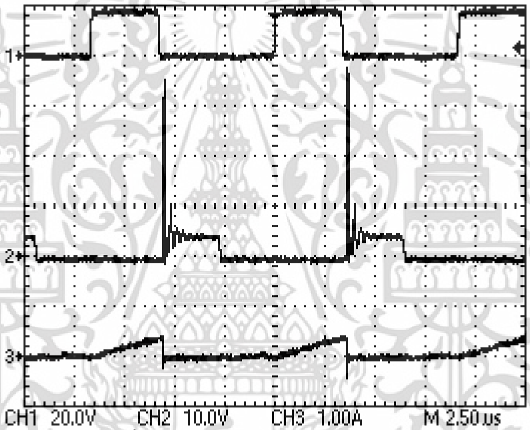
รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



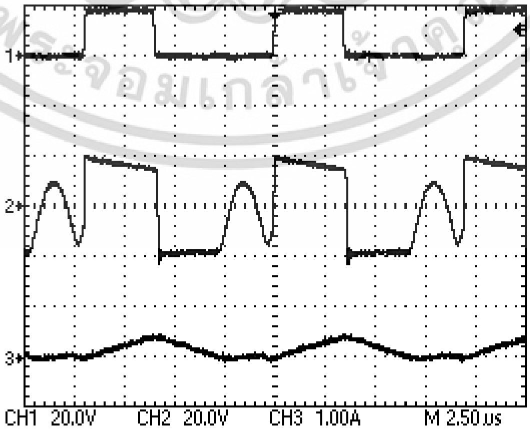
รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_1 , รูปล่าง : i_1

รูปที่ 5.4 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_1



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปล่าง : v_2 , รูปล่าง : i_2

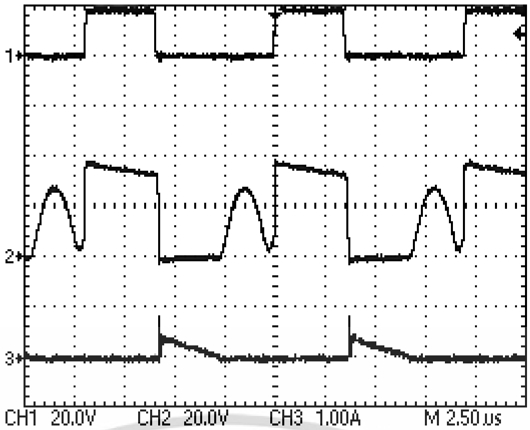
รูปที่ 5.5 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไดโอด D_2



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_{L2} , รูปล่าง : i_{L2}

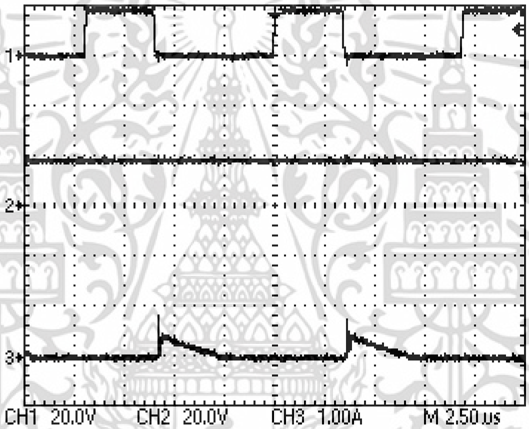
รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_3 , รูปล่าง : i_3

รูปที่ 5.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า D_3



รูปบน : ค่าดิวตี้ไซเคิล D_1 , รูปกลาง : v_{C2} , รูปล่าง : i_{C2}

รูปที่ 5.8 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_2

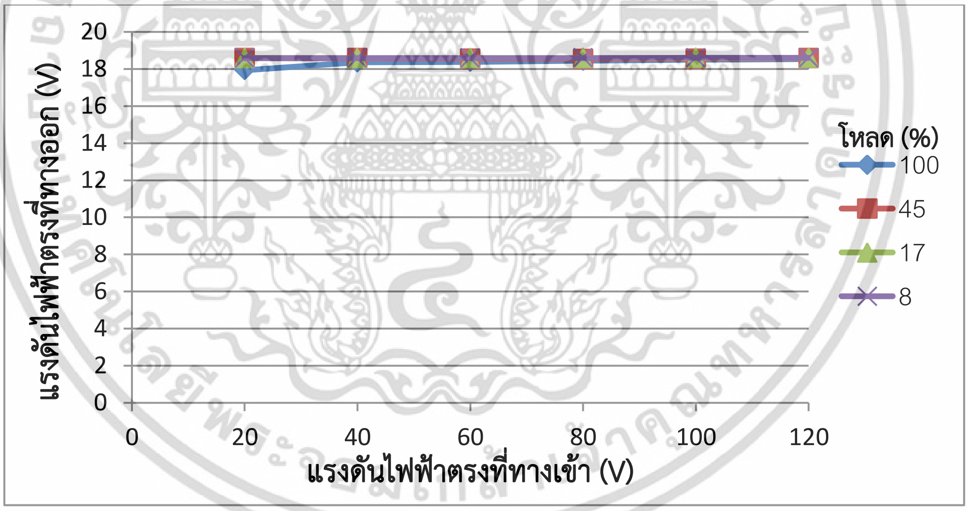
5.4 การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะคงตัว

การทดลองนี้เป็นการตรวจสอบความสามารถการตอบสนองที่สภาวะคงตัวของดีซี – ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีค่าเปลี่ยนไป และหรือ เมื่อโหลดความต้านทานที่ทางออกมีค่าเปลี่ยนไป การทดลองนี้ทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า 20 - 120V ที่แต่ละโหลดความต้านทานที่ทางออกจำนวนสี่ตัว คือ 8% , 17% , 45% และ 100% ของพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 รูปที่ 5.9 แสดงผลการทดลองการรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลง และรูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองการรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อกระแสไฟฟ้าที่โหลดความต้านทาน R ที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

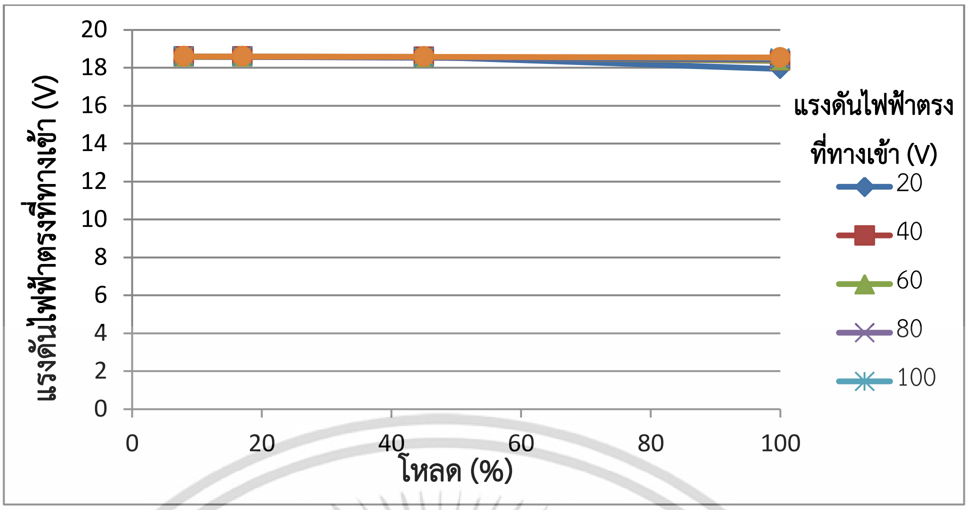
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกในสภาวะคงตัวของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและค่าโหลดที่ทางออกต่างๆ

แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า (V)	แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก (V)			
	โหลด 8%	โหลด 17%	โหลด 45%	โหลด 100%
20	18.58	18.58	18.58	17.93
40	18.58	18.58	18.57	18.36
60	18.58	18.58	18.55	18.38
80	18.59	18.58	18.53	18.44
100	18.60	18.59	18.55	18.50
120	18.60	18.60	18.58	18.54



รูปที่ 5.9 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลง

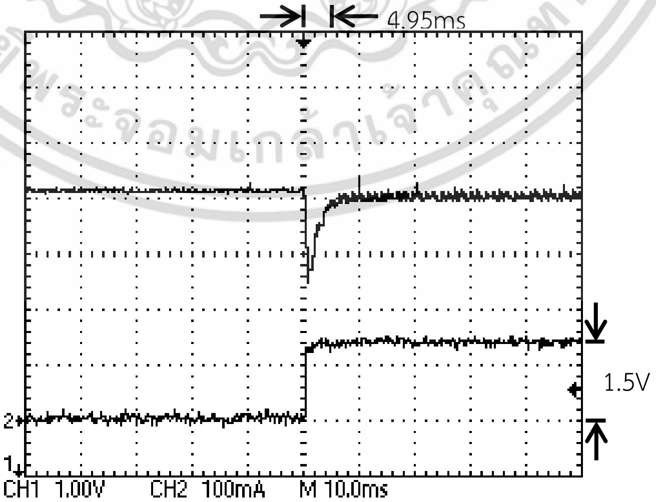
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกเมื่อโหลดที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลง

5.5 การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะพลวัต

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะพลวัตของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ โดยการตรวจสอบความสามารถของระบบควบคุม ซึ่งเมื่อเกิดกรณีที่กระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดมี ระบบควบคุมต้องรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้กลับมามีค่าตามพิกัดได้รวดเร็วที่สุด ในการทดลองกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีค่าเป็น 20V แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกตามพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า 18V และกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลง โดยโหลดเปลี่ยนแปลงจาก 8% เป็น 100% ที่พิกัดแบบทันทีทันใด ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปบน : แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก , รูปล่าง : กระแสไฟฟ้าที่โหลดความต้านทาน R

รูปที่ 5.11 ผลการทดลองการตอบสนองที่สภาวะพลวัตของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การทดลองประสิทธิภาพ

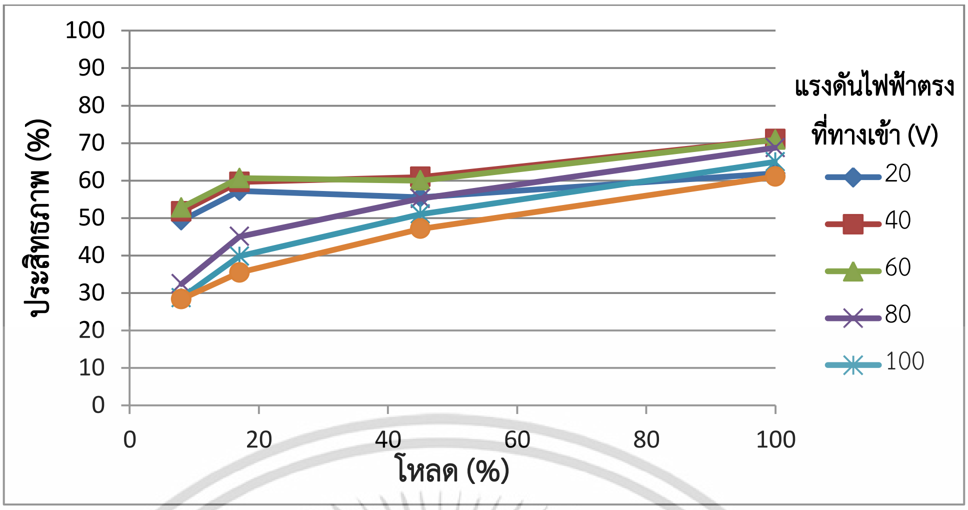
การคำนวณค่าประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ คำนวณจากผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ทางเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ทางออกด้วยสมการที่ (5.1) แล้วแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 5.2 ส่วนรูปที่ 5.12 แสดงประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและที่ค่าโหลดที่ทางออกต่างๆกัน

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{V_g I_g}{\left(\frac{V^2}{R}\right)} \tag{5.1}$$

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดค่าประสิทธฺภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและค่าโหลดที่ทางออกต่างๆ

แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า (V)	ประสิทธิภาพ (%)			
	โหลด 8%	โหลด 17%	โหลด 45%	โหลด 100%
20	49.32	57.23	55.49	61.9
40	51.70	59.62	60.95	71.00
60	52.76	60.62	59.99	70.88
80	32.40	45.06	55.16	68.75
100	28.69	39.78	51.04	64.97
120	28.35	35.44	47.10	61.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ

5.7 บทสรุป

ผลการทดลองของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบทั้งสี่กรณีสามารถสรุปการทดลองได้คือ

- **การทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ :** สังเกตได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบได้รูปสัญญาณขณะทำงานเป็นการทำงานในโหมดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องตามการวิเคราะห์ในบทที่สอง แต่อาจจะมีความแตกต่างในรูปสัญญาณบ้างเนื่องการวิเคราะห์ในบทนั้นเป็นการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ทางอุดมคติ

- **การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะคงตัว :** ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงความสามารถที่สภาวะคงตัวในการรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกให้คงที่ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า และหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟฟ้าที่โหลดความต้านทาน R ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สามารถใช้สมการที่ (5.2) คำนวณค่าของไลน์เรกกูเลชัน (Line Regulation) ที่ค่าโหลดความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และสามารถใช้สมการที่ (5.3) คำนวณค่าของโหลดเรกกูเลชัน (Load Regulation) ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.4

$$\text{Line Regulation} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \times 100\% \qquad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการวัดค่าไลน์เรกกูเลชันของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลงจาก 20V เป็น120V ที่ค่าโหลดต่างๆ

แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า (V)	**ไลน์เรกกูเลชัน (%)**			
	โหลด 8%	**โหลด 17%**	**โหลด 45%**	**โหลด 100%**
20 - 120	0.02	0.02	0	0.61

$$\text{Load Regulation} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (5.3)$$

ตารางที่ 5.4 ผลการวัดค่าโหลดเรกกูเลชันของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0% เป็น 100% ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าต่างๆ

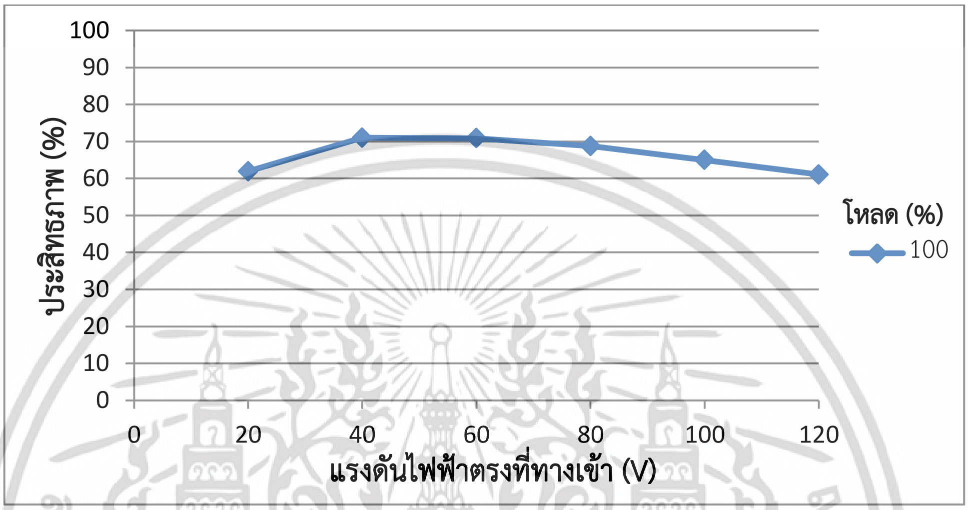
แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า (V)	**โหลดเรกกูเลชัน (%)**
	โหลด 0-100%
20	3.62
40	1.19
60	1.09
80	0.81
100	0.54
120	0.32

- **การทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองที่สภาวะพลวัต :** ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.11 แสดงถึงความสามารถของระบบควบคุมที่ควบคุมสภาวะพลวัตของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ ที่สามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าที่ทางออกอย่างทันทีทันใด ดังแสดงด้วยผลการทดลองที่ทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ทางออกจาก 8% เป็น 100% ของพิกัด แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกมีค่าลดลงทันที 1.5 V หรือ 8.3% ของพิกัด แต่ระบบควบคุมที่ออกแบบสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกกลับมาที่ค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงตามพิกัด (18 V) ได้ภายในเวลา 5ms

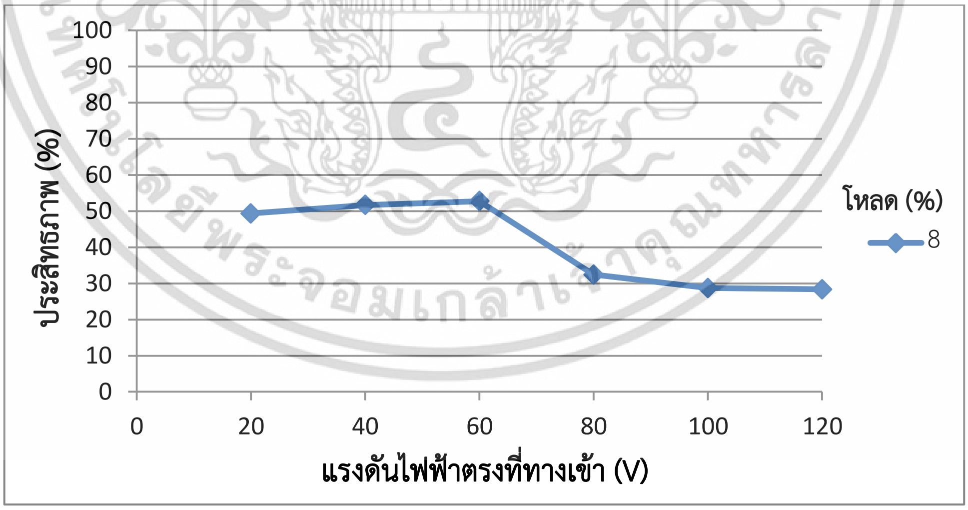
- **การทดลองประสิทธิภาพ :** ผลการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ รูปที่ 5.13 แสดงผลมีประสิทธิภาพสูงที่ขนาดพิกัดโหลด 100% ทั้งนี้เพราะเมื่อทำงานที่พิกัดนี้กำลังไฟฟ้าสูญเสียคงที่ภายในคอนเวอร์เตอร์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ทางออก ส่วนรูปที่ 5.14 แสดงประสิทธิภาพที่ขนาดพิกัดโหลด 8% มีค่าสูงที่แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าอยู่ในย่านต่ำ (20 – 60V) ทั้งนี้เพราะดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบถูกออกแบบให้ทำงานมีประสิทธิภาพสูงในย่านแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าย่านนั้น



รูปที่ 5.13 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลด 100%



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบที่โหลด 8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอผลงานวิจัยจากการวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้าง และการทดลองดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงให้กับดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักของระบบรับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงที่เหมาะให้กับปั๊มน้ำแรงดันไฟฟ้าตรงในงานเกษตรกรรม ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ ที่สร้างขึ้นมีขนาดพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไปคือ แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า 20 – 120V และแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออก 18V (3W) โดยหลังจากการวิเคราะห์และออกแบบผู้วิจัยได้สร้างและทดสอบการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ผลจากการตรวจสอบรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการทำงานที่อุปกรณ์แต่ละตัวสังเกตได้ว่าอุปกรณ์เหล่านั้นสามารถทำงานได้ตามทฤษฎี และเมื่อทดลองปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง 120V ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบที่สร้างขึ้นยังมีค่าของดิวตี้ไซเคิลเพียงพอที่จะทำงานเพื่อรักษาแรงดันฟ้าตรงที่ทางออกให้ได้ตามพิกัด ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นผลการทดลองเพื่อยืนยันข้อดีของดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนเวอร์เตอร์แบบสเตทเดียว ผลการทดลองต่อมาซึ่งเป็นการทดลองที่สภาวะคงตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้า (20 – 120V) และหรือการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่โหลด (8 – 100%) ผลการทดลองที่ได้แสดงการทำงานของระบบควบคุมซึ่งสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าตามพิกัดที่ต้องการ โดยมีค่าไลน์เรกกูเลชันสูงสุดไม่เกิน 0.61% เมื่อทดลองขณะกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออกสูงสุด (100%) และค่าโหลดเรกกูเลชันสูงสุดไม่เกิน 3.62% เมื่อทดลองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าต่ำสุด (20V) ส่วนผลการทดลองที่สภาวะพลวัตซึ่งแสดงการตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดของกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออก (8 – 100%) ของพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้แสดงได้ว่าระบบควบคุมสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงกลับคืนตามค่าพิกัดได้อย่างรวดเร็ว โดยแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกมีค่าลดลงทันทีทันใด 8.3% ของพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และระบบควบคุมใช้เวลา 5ms ในการทำให้แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกกลับคืนตามค่าพิกัดดังเดิม การทดลองสุดท้ายเป็นการทดลองวัดประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวต้นแบบ ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพปานกลางตั้งแต่ 30 – 70% แปรตามค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าและค่าขนาดกระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออก สาเหตุที่ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบมีค่าของประสิทธิภาพปานกลางทั้งนี้เพราะดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวต้องถูกนำไปใช้กับสภาวะแวดล้อมที่มีพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างซึ่งมีผลต่อขั้นตอนการออกแบบคือ ประการแรกแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้ามีค่าตั้งแต่ 20 – 120V ซึ่งทำให้การออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงตลอดย่านพิสัยดังกล่าวทำได้ยาก ในการออกแบบสามารถเลือกคำนวณให้ได้ประสิทธิภาพสูงเฉพาะที่ย่านแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าแคบๆ ที่ย่านใดย่านหนึ่งเท่านั้น ประการที่สองปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าตรงโหลดที่ทางออกเพื่อจ่ายให้กับดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์กำลังหลักมีค่าไม่แน่นอนและมีพิสัยกว้าง ดังนั้นการออกแบบเพื่อเลือกโหมดการทำงานของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวต้นแบบ จึงต้องกำหนดให้ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อทำงานในโหมดนี้ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์มีค่าสูงมาก ทำให้เกิดการสูญเสียสูงที่อุปกรณ์นั้นๆ และมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวมีค่าปานกลางดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีปานกลางแต่ก็ไม่มีผลกระทบมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบโดยรวมทั้งหมด ทั้งนี้เพราะกำลังไฟฟ้าที่ต้องการของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียวมีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำเพียง 3W เท่านั้น

ผลงานวิจัยเรื่องดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวดังกล่าว ได้ผลงานเป็นดีซี – ดีซีคอนเวอร์เตอร์ขนาดเล็กสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรงให้กับระบบไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์หลักอื่นๆ และมีคุณสมบัติหลักสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกได้ตามพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต้องการ แต่มีเพียงค่าของประสิทธิภาพที่มีค่าปานกลางซึ่งเกิดจากการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนวทางในการพัฒนาเพื่องานวิจัยต่อไป โดยการกำหนดให้ ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์มีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียในอุปกรณ์นั้นๆ ที่เกิดขึ้นลดลงและมีผลให้ค่าประสิทธิภาพของดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวเพิ่มขึ้น แต่การกำหนดให้ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง อาจทำให้มีปัญหาเพราะจากพิกัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าโหลดที่ทางออกมีพิสัยที่กว้างมาก ทำให้ดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียวอาจต้องทำงานทั้งโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องหรือโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่องสลับกันตามปริมาณของขนาดกระแสไฟฟ้าตรงโหลดที่ทางออก ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมป้อนกลับเชิงเส้นชนิดอนาล็อกที่สามารถควบคุมได้ทั้งสองโหมดการทำงานสลับไปมาทำได้ยาก งานวิจัยต่อไปผู้วิจัยเสนอแนะอาจใช้ระบบควบคุมเชิงดิจิตอลที่สามารถควบคุมได้ทั้งสองโหมดการทำงานดังกล่าวว่าได้ดังเช่นงานวิจัยของ Monthon Nawomg และคณะ [11] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] REC Group. **"High Performance Solar Panels"** [Online]. Available : http://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/rec_pe_series_rev.u_eng.pdf. 2014

[2] Mitsubishi Heavy Industries, LTD. **"Mitsubishi Tandem Photovoltaic Module"** [Online]. Available : http://www.dionicenergy.com/files/1/pdf/MITSUBISHI%20MT130.pdf. 2007

[3] Bill Andreycak "Elegantly Simple Off – line Bias Supply For Very Low Power Application", **Unitrode Application Handbook**, April 1997, pp.3-416 – 426

[4] Daniel W. Hart. **Power Electronics.** New York : McGraw – Hill. 2011.

[5] Jack Golten and Andy Verwer, **Control System Design and Simulation**, London : McGraw – Hill Book Company Europe. 1991.

[6] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, **Fundamental of Power Electronics**, 2nd Edition, New York : Kluwer Academic Publishers, 2001.

[7] H. Dean Venable. "The K Factor: A New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesis" **Linear Technology Reference Reading#4**.

[8] Dragan Maksimovic and Slobodan Cuk, "Switching Converters with Wide DC Conversion Range", **IEEE Trans. on Power Electronics**, vol.6, no.1, Jan. 1991, pp.151 – 157.

[9] J.Marcos et. all, "Analysis and Design of the Quadratic Buck – Boost Converter as a High – Power – Factor Driver for Power – LED Lamps", **IECON 2010**, Nov. 2010, pp. 2541 – 2546.

[10] P.J. Akhiljith et. all, "PWM Switched Double Stage Buck Boost Converter with LC Filter for LED Lighting Applications", **IJAREEIE**, Vol.3, no.5, Dec. 2014, pp. 269 – 276.

[11] Monthon Nawomg, Saliltip Sinthusonthishat and Nontawat Chuladaycha, "Digital Control Based on a Non-Linear Switching Surface Technique," **International Review of Electrical Engineering (IREE)**, vol.9, no.3, June 2014, pp. 466-475.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์แบบจำลองดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว

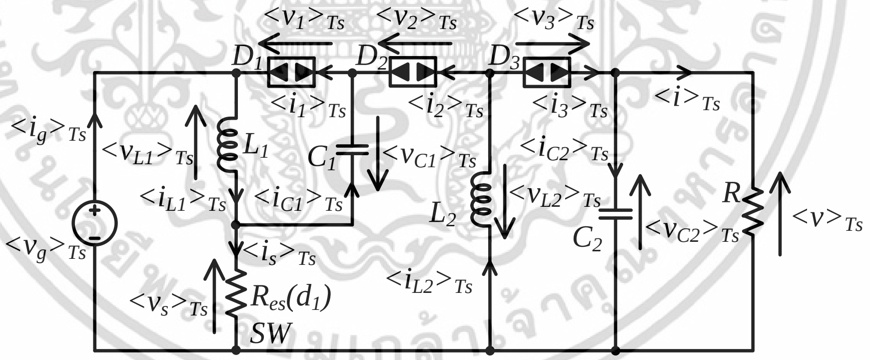
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การจำลองแบบดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์โดยวิธี Averaged Switch Model

การหาแบบจำลองโดยวิธี Averaged Switch Model มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. เขียนสมการค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ในวงจรจากรูปสัญญาณการทำงาน โดยรวมทุกสภาวะการทำงานที่ปรากฏในหนึ่งคาบเวลาสวิตช์
2. รบกวนสมการของระบบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ด้วยสัญญาณเอซีขนาดเล็กรอบจุดการทำงาน (Operating point) ที่สภาวะคงตัว ซึ่งในสมการจะมีเทอมของสัญญาณดีซี (DC Term) และเทอมของสัญญาณเอซีขนาดเล็ก (Small-Signal AC Term)
3. จากสมการของเทอมของสัญญาณดีซี (DC Term) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 คือสมการที่สภาวะคงตัว (Steady State Equation) ซึ่งนำมาแก้สมการเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงตัว
4. จากสมการของเทอมของสัญญาณเอซีขนาดเล็ก (Small-Signal AC Term) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 คือสมการเชิงเส้นสัญญาณขนาดเล็ก (Linear Small-Signal Equation) ซึ่งนำมาแก้สมการเพื่อหาฟังชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) ได้

ก.2 การหาค่าเฉลี่ยการทำงานของอุปกรณ์ในวงจร



รูปที่ ก.1 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

ตัวเหนี่ยวนำ L_1

$$i_{L1P} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{L_1} d_1 T_s \qquad (ก.1)$$

$$\langle v_{L1} \rangle_{T_s} = d_1 \langle v_g \rangle_{T_s} - d_2 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} = 0 \qquad (ก.2)$$

$$d_1 \langle v_g \rangle_{T_s} = d_2 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} \qquad (ก.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_2 = d_1 \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}} \tag{ก.4}$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}} \tag{ก.5}$$

ตัวเหนี่ยวนำ L_2

$$i_{L2P} = \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{L_2} d_1 T_s \tag{ก.6}$$

$$\langle v_{L2} \rangle_{T_s} = d_1 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} - d_2 \langle v_{C2} \rangle_{T_s} = 0 \tag{ก.7}$$

$$d_1 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} = d_2 \langle v_{C2} \rangle_{T_s} \tag{ก.8}$$

$$d_2 = d_1 \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{\langle v_{C2} \rangle_{T_s}} \tag{ก.9}$$

$$\langle v_{C2} \rangle_{T_s} = \langle v \rangle_{T_s} \tag{ก.10}$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{\langle v \rangle_{T_s}} \tag{ก.11}$$

ตัวเก็บประจุ C_1

$$\langle i_{C1} \rangle_{T_s} = \frac{1}{2}(-i_{L2P}) d_1 + \frac{1}{2}(i_{L1P}) d_2 \tag{ก.12}$$

(ก.1)(ก.6)(ก.12)

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{L_2} d_1\right) d_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{L_1} d_1\right) d_2 \tag{ก.13}$$

$$\frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{L_2} d_1^{\,2} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{L_1} d_1 d_2 \tag{ก.14}$$

$$\frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}}{\langle v_g \rangle_{T_s}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \tag{ก.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก.5)(ก.15)

$$\left(\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{\langle v_g\rangle_{T_s}}\right)\left(\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}\right)=\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\left(\frac{L_2}{L_1}\right)\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (ก.16)$$

$$\frac{d_2}{d_1}=\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (ก.17)$$

$$d_2=d_1\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (ก.18)$$

(ก.5)(ก.18)

$$\langle v_{C1}\rangle_{T_s}=\langle v_g\rangle_{T_s}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (ก.19)$$

ช่วงเวลาใน 1 คาบเวลา

$$d_1+d_2+d_3=1 \quad (ก.20)$$

$$d_3=1-d_1-d_2 \quad (ก.21)$$

(ก.5) × (ก.11)

$$\left(\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}\right)\left(\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{\langle v\rangle_{T_s}}\right)=\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (ก.22)$$

$$\left(\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v\rangle_{T_s}}\right)=\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (ก.23)$$

สวิตช์ SW

- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle v_s\rangle_{T_s}$

$$\langle v_s\rangle_{T_s}=d_1\cdot 0+d_2\left(\langle v_g\rangle_{T_s}+\langle v_{C1}\rangle_{T_s}\right)+d_3\left(\langle v_g\rangle_{T_s}\right) \quad (ก.24)$$

(ก.21)(ก.24)

$$\langle v_s\rangle_{T_s}=d_2\langle v_g\rangle_{T_s}+d_2\langle v_{C1}\rangle_{T_s}+\langle v_g\rangle_{T_s}-d_1\langle v_g\rangle_{T_s}-d_2\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left\langle v_s \right\rangle_{T_s} = d_2 \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} + \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} - d_1 \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.26}$$

(ก.4)(ก.26)

$$\left\langle v_s \right\rangle_{T_s} = \left(d_1 \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{\left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}} \right) \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} + \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} - d_1 \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.27}$$

$$\left\langle v_s \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.28}$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $\left\langle i_s \right\rangle_{T_s}$

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{1}{2} \left(i_{L1P} + i_{L2P} \right) d_1 \tag{ก.29}$$

(ก.1)(ก.6)(ก.29)

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{L_1} d_1 T_s + \frac{\left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}}{L_2} d_1 T_s \right) d_1 \tag{ก.30}$$

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{1}{2} \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{L_1} d_1^2 T_s + \frac{1}{2} \frac{\left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}}{L_2} d_1^2 T_s \tag{ก.31}$$

(ก.19)(ก.31)

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{1}{2} \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}}{L_1} d_1^2 T_s + \frac{1}{2L_2} \left(\left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) d_1^2 T_s \tag{ก.32}$$

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} + \frac{d_1^2 T_s}{2\sqrt{L_1 L_2}} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.33}$$

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}} \right) \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.34}$$

$$L_{es} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{ก.35}$$

(ก.34)(ก.35)

$$\left\langle i_s \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_{es}} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \tag{ก.36}$$

$$R_{es} = \frac{2L_{es}}{d_1^2 T} \tag{ก.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{e1} = \frac{2L_1}{d_1^{\,2}T} \tag{ก.38}$$

$$R_{e2} = \frac{2\sqrt{L_1 L_2}}{d_1^{\,2}T} \tag{ก.39}$$

(ก.36)(ก.37)

$$\langle i_s \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{R_{es}} \tag{ก.40}$$

(ก.28)(ก.40)

$$\langle i_s \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}}{R_{es}} \tag{ก.41}$$

(ก.33)(ก.38)(ก.39)

$$\langle i_s \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{R_{e1}} + \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{R_{e2}} \tag{ก.42}$$

(ก.28)(ก.42)

$$\langle i_s \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}}{R_{e1}} + \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}}{R_{e2}} \tag{ก.43}$$

- กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle p_s \rangle_{T_s}$

$\langle v_s \rangle_{T_s}$ × (ก.43)

$$\langle p_s \rangle_{T_s} = \langle v_s \rangle_{T_s} \langle i_s \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}^{\,2}}{R_{e1}} + \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}^{\,2}}{R_{e2}} \tag{ก.44}$$

ไดโอด D_1

- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle v_1 \rangle_{T_s}$

$$\langle v_1 \rangle_{T_s} = d_1\left(\langle v_g \rangle_{T_s} + \langle v_{C1} \rangle_{T_s}\right) + d_2 \cdot 0 + d_3\left(\langle v_{C1} \rangle_{T_s}\right) \tag{ก.45}$$

(ก.21)(ก.45)

$$\langle v_1 \rangle_{T_s} = d_1 \langle v_g \rangle_{T_s} + d_1 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} + \langle v_{C1} \rangle_{T_s} - d_1 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} - d_2 \langle v_{C1} \rangle_{T_s} \tag{ก.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = d_1\langle v_g\rangle_{T_s} + \langle v_{C1}\rangle_{T_s} - d_2\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.47)$$

(ก.4)(ก.47)

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = d_1\langle v_g\rangle_{T_s} + \langle v_{C1}\rangle_{T_s} - \left(d_1\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.48)$$

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = \langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.49)$$

(ก.19)(ก.49)

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = \langle v_g\rangle_{T_s}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (ก.50)$$

(ก.28)(ก.50)

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = \langle v_s\rangle_{T_s}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (ก.51)$$

$$k = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (ก.52)$$

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = k\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.53)$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle i_1\rangle_{T_s}$

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}(i_{L1P})d_2 \quad (ก.54)$$

(ก.1)(ก.54)

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}\left(\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{L_1}d_1T_s\right)d_2 \quad (ก.55)$$

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{d_1d_2T_s}{2L_1}\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.56)$$

(ก.4)(ก.56)

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{d_1T_s}{2L_1}\left(d_1\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}} \quad (ก.58)$$

(ก.19)(ก.58)

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v_g \rangle_{T_s}} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (ก.59)$$

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2\sqrt{L_1 L_2}} \langle v_g \rangle_{T_s} \quad (ก.60)$$

(ก.39)(ก.60)

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{R_{e2}} \quad (ก.61)$$

(ก.28)(ก.61)

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}}{R_{e2}} \quad (ก.62)$$

(ก.19)(ก.58)

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \frac{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}^2}{\langle v_{C1} \rangle_{T_s}} \frac{L_1}{L_2} \quad (ก.63)$$

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \langle v_{C1} \rangle_{T_s} \quad (ก.64)$$

(ก.49)(ก.64)

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \langle v_1 \rangle_{T_s} \quad (ก.65)$$

$$\langle i_1 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1 \rangle_{T_s}}{R_{e3}} \quad (ก.66)$$

$$R_{e3} = \frac{2L_2}{d_1^2 T_s} \quad (ก.67)$$

(ก.49)(ก.58)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left\langle i_1\right\rangle_{T_s}=\frac{d_1^{\,2}T_s}{2L_1}\frac{\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}^{\,2}}{\left\langle v_1\right\rangle_{T_s}} \tag{ก.68}$$

- กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย $\left\langle p_1\right\rangle_{T_s}$

$\left\langle v_1\right\rangle_{T_s}$ × (ก.68)

$$\left\langle p_1\right\rangle_{T_s}=\left\langle v_1\right\rangle_{T_s}\left\langle i_1\right\rangle_{T_s}=\frac{d_1^{\,2}T_s}{2L_1}\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}^{\,2} \tag{ก.69}$$

(ก.28)(ก.69)

$$\left\langle p_1\right\rangle_{T_s}=\frac{d_1^{\,2}T_s}{2L_1}\left\langle v_s\right\rangle_{T_s}^{\,2} \tag{ก.70}$$

(ก.38)(ก.70)

$$\left\langle p_1\right\rangle_{T_s}=\frac{\left\langle v_s\right\rangle_{T_s}^{\,2}}{R_{e1}} \tag{ก.71}$$

ไดโอด Port D_2

- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย $\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}$

$$\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}=d_1\cdot 0+d_2\left(\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C2}\right\rangle_{T_s}\right)+d_3\left(\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}\right) \tag{ก.72}$$

(ก.21)(ก.72)

$$\begin{aligned}\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}&=d_2\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-d_2\left\langle v_{C2}\right\rangle_{T_s}+\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-d_1\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-d_2\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}\\&\quad+d_1\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}+d_2\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}\end{aligned} \tag{ก.73}$$

$$\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}=-d_2\left\langle v_{C2}\right\rangle_{T_s}+\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-d_1\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}+d_1\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}+d_2\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s} \tag{ก.74}$$

(ก.4)(ก.74)

$$\begin{aligned}\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}&=-d_2\left\langle v_{C2}\right\rangle_{T_s}+\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-d_1\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}+d_1\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}\\&\quad+\left(d_1\frac{\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}}{\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}}\right)\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}\end{aligned} \tag{ก.75}$$

$$\left\langle v_2\right\rangle_{T_s}=-d_2\left\langle v_{C2}\right\rangle_{T_s}+\left\langle v_g\right\rangle_{T_s}-\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s}+d_1\left\langle v_{C1}\right\rangle_{T_s} \tag{ก.76}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก.9)(ก.76)

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = -\left(d_1\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{\langle v_{C2}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_{C2}\rangle_{T_s} + \langle v_g\rangle_{T_s} - \langle v_{C1}\rangle_{T_s} + d_1\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.77)$$

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = \langle v_g\rangle_{T_s} - \langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.78)$$

(ก.19)(ก.78)

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = \langle v_g\rangle_{T_s} - \langle v_g\rangle_{T_s}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (ก.79)$$

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = \left(1-\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}\right)\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.80)$$

(ก.52)(ก.80)

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = (1-k)\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.81)$$

(ก.28)(ก.81)

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = (1-k)\langle v_s\rangle_{T_s} \quad (ก.82)$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle i_2\rangle_{T_s}$

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}(i_{L2P})d_1 \quad (ก.83)$$

(ก.6)(ก.83)

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}\left(\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{L_2}d_1T_s\right)d_1 \quad (ก.84)$$

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2}T_s}{2L_2}\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.85)$$

(ก.19)(ก.85)

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2}T_s}{2L_2}\left(\langle v_g\rangle_{T_s}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}\right) \quad (ก.86)$$

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2}T_s}{2\sqrt{L_1L_2}}\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก.39)(ก.87)

$$\left\langle i_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2} T_s}{2\sqrt{L_1 L_2}} \left\langle v_s \right\rangle_{T_s} \tag{ก.88}$$

(ก.28)(ก.88)

$$\left\langle i_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_s \right\rangle_{T_s}}{R_{e2}} \tag{ก.89}$$

- กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย $\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s}$

(ก.78)(ก.85)

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \left\langle v_2 \right\rangle_{T_s} \left\langle i_2 \right\rangle_{T_s} = \left(\left\langle v_g \right\rangle_{T_s} - \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} \right) \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_2} \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} \tag{ก.90}$$

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_2} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s} \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} - \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_2} \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}^{2} \tag{ก.91}$$

(ก.19)(ก.91)

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^{2} - \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_2} \frac{L_2}{L_1} \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}^{2} \tag{ก.92}$$

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\,2} T_s}{2\sqrt{L_1 L_2}} \left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^{2} - \frac{d_1^{\,2} T_s}{2L_1} \left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s}^{2} \tag{ก.93}$$

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^{2}}{R_{e2}} - \frac{\left\langle v_g \right\rangle_{T_s}^{2}}{R_{e1}} \tag{ก.94}$$

(ก.28)(ก.94)

$$\left\langle p_2 \right\rangle_{T_s} = \frac{\left\langle v_s \right\rangle_{T_s}^{2}}{R_{e2}} - \frac{\left\langle v_s \right\rangle_{T_s}^{2}}{R_{e1}} \tag{ก.95}$$

ไดโอด D_3

- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย $\left\langle v_3 \right\rangle_{T_s}$

$$\left\langle v_3 \right\rangle_{T_s} = d_1 \left(\left\langle v_{C1} \right\rangle_{T_s} + \left\langle v_{C2} \right\rangle_{T_s} \right) + d_2 \cdot 0 + d_3 \left(\left\langle v_{C2} \right\rangle_{T_s} \right) \tag{ก.96}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก.21)(ก.96)

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = d_1\langle v_{C1}\rangle_{T_s} + d_1\langle v_{C2}\rangle_{T_s} + \langle v_{C2}\rangle_{T_s} - d_1\langle v_{C2}\rangle_{T_s} - d_2\langle v_{C2}\rangle_{T_s} \quad (ก.97)$$

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = d_1\langle v_{C1}\rangle_{T_s} + \langle v_{C2}\rangle_{T_s} - d_2\langle v_{C2}\rangle_{T_s} \quad (ก.98)$$

(ก.4)(ก.98)

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = d_1\langle v_{C1}\rangle_{T_s} + \langle v_{C2}\rangle_{T_s} - \left(d_1\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{\langle v_{C2}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_{C2}\rangle_{T_s} \quad (ก.99)$$

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = \langle v_{C2}\rangle_{T_s} \quad (ก.100)$$

(ก.10)(ก.100)

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = \langle v\rangle_{T_s} \quad (ก.101)$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle i_3\rangle_{T_s}$

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}(i_{L2P})d_2 \quad (ก.102)$$

(ก.6)(ก.102)

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{1}{2}\left(\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{L_2}d_1T_s\right)d_2 \quad (ก.103)$$

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1d_2T_s}{2L_2}\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.104)$$

(ก.4)(ก.104)

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1T_s}{2L_2}\left(d_1\frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_{C1}\rangle_{T_s} \quad (ก.105)$$

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1^2T_s}{2L_2}\langle v_g\rangle_{T_s} \quad (ก.106)$$

$$R_{e3} = \frac{2L_2}{d_1^2T_s} \quad (ก.107)$$

(ก.106)(ก.107)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{R_{e3}} \tag{ก.108}$$

(ก.28)(ก.108)

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s \rangle_{T_s}}{R_{e3}} \tag{ก.109}$$

(ก.106) × $\dfrac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{\langle v_g \rangle_{T_s}}$

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \langle v_g \rangle_{T_s} \left(\frac{\langle v_g \rangle_{T_s}}{\langle v_g \rangle_{T_s}} \right) \tag{ก.110}$$

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v_g \rangle_{T_s}} \tag{ก.111}$$

(ก.23)(ก.111)

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v \rangle_{T_s}} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \tag{ก.112}$$

(ก.18)(ก.112)

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_2} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v \rangle_{T_s}} \frac{L_2}{L_1} \tag{ก.113}$$

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v \rangle_{T_s}} \tag{ก.114}$$

(ก.101)(ก.114)

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{d_1^2 T_s}{2L_1} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v_3 \rangle_{T_s}} \tag{ก.115}$$

(ก.38)(ก.115)

$$\langle i_3 \rangle_{T_s} = \frac{1}{R_{e1}} \frac{\langle v_g \rangle_{T_s}^2}{\langle v_3 \rangle_{T_s}} \tag{ก.116}$$

(ก.28)(ก.116)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{1}{R_{e1}}\frac{\langle v_s\rangle_{T_s}^{\ 2}}{\langle v_3\rangle_{T_s}} \tag{ก.117}$$

- กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย $\langle p_3\rangle_{T_s}$

$\langle v_3\rangle_{T_s}$ × (ก.104)

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \langle v_3\rangle_{T_s}\langle i_3\rangle_{T_s} = \langle v_3\rangle_{T_s}\left(\frac{d_1 d_2 T_s}{2L_2}\langle v_{C1}\rangle_{T_s}\right) \tag{ก.118}$$

(ก.100)(ก.118)

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1 d_2 T_s}{2L_2}\langle v_{C1}\rangle_{T_s}\langle v_{C2}\rangle_{T_s} \tag{ก.119}$$

(ก.11)(ก.119)

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1 T_s}{2L_2}\left(d_1\frac{\langle v_{C1}\rangle_{T_s}}{\langle v_{C2}\rangle_{T_s}}\right)\langle v_{C1}\rangle_{T_s}\langle v_{C2}\rangle_{T_s} \tag{ก.120}$$

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\ 2} T_s}{2L_2}\langle v_{C1}\rangle_{T_s}^{\ 2} \tag{ก.121}$$

(ก.19)(ก.121)

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\ 2} T_s}{2L_2}\langle v_g\rangle_{T_s}^{\ 2}\frac{L_2}{L_1} \tag{ก.122}$$

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\ 2} T_s}{2L_1}\langle v_g\rangle_{T_s}^{\ 2} \tag{ก.123}$$

(ก.28)(ก.123)

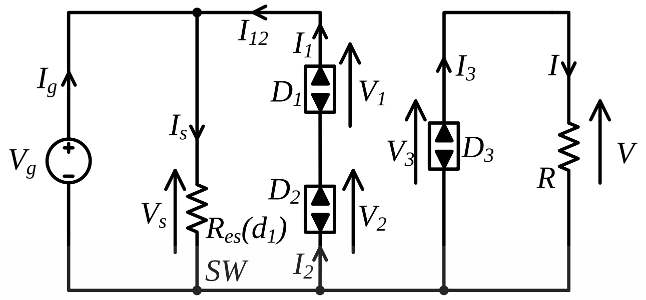
$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{d_1^{\ 2} T_s}{2L_1}\langle v_s\rangle_{T_s}^{\ 2} \tag{ก.124}$$

(ก.38)(ก.124)

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s\rangle_{T_s}^{\ 2}}{R_{e1}} \tag{ก.125}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การวิเคราะห์วงจรจำลองชนิดดีซี



รูปที่ ก.2 แบบจำลองชนิดดีซีของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

$$P_3 = P_{out} = \frac{V^2}{R} \qquad (ก.126)$$

(ก.125)

$$P_3 = \frac{V_s^2}{R_{e1}} \qquad (ก.127)$$

(ก.126)(ก.127)

$$\frac{V_s^2}{R_{e1}} = \frac{V^2}{R} \qquad (ก.128)$$

$$\frac{V}{V_s} = \sqrt{\frac{R}{R_{e1}}} \qquad (ก.129)$$

(ก.28)(ก.38)(ก.129)

$$\frac{V}{V_g} = \sqrt{\frac{RD_1^2T_s}{2L_1}} \qquad (ก.130)$$

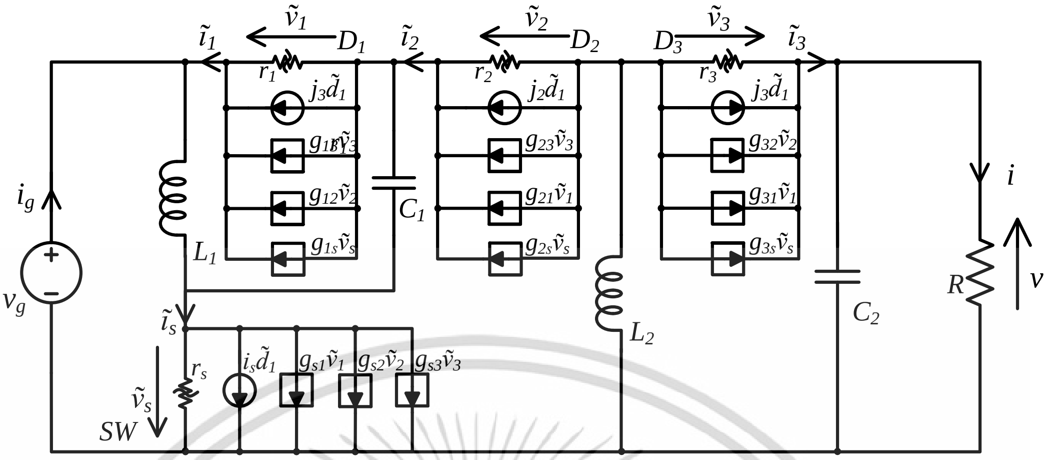
$$\frac{V}{V_g} = D_1\sqrt{\frac{RT_s}{2L_1}} = M(D_1) \qquad (ก.131)$$

(ก.28)(ก.101)(ก.131)

$$\frac{V_3}{V_s} = D_1\sqrt{\frac{RT_s}{2L_1}} = M(D_1) \qquad (ก.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การวิเคราะห์วงจรจำลองชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ ก.3 แบบจำลองเชิงความถี่ชนิดสัญญาณรบกวนเอซีขนาดเล็กของส่วนจ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง

สวิตช์ SW

$$\langle i_s\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_s\rangle_{T_s}}{R_{es}(d_1)} = f_s\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \quad (ก.133)$$

$$\begin{aligned} I_s + \tilde{i}_s = {} & f_s(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) + \tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_s(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \\ & + \tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_s(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} + \tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \\ & + \tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} + \tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_s(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \\ & + \text{higher-order nonlinear terms} \end{aligned} \quad (ก.134)$$

$$I_s = f_s(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) = \frac{V_s}{R_{es}(D_1)} \quad (ก.135)$$

$$\tilde{i}_s = \frac{\tilde{v}_s}{r_s} + g_{s1}\tilde{v}_1 + g_{s2}\tilde{v}_2 + g_{s3}\tilde{v}_3 + j_s\tilde{d}_1 \quad (ก.136)$$

$$\frac{1}{r_s} = \left.\frac{\partial f_s(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \quad (ก.137)$$

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial}{\partial v_s}\left.\left(\frac{v_s}{R_{es}(D_1)}\right)\right|_{v_s=V_s} \quad (ก.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{R_{es}(D_1)} \tag{ก.139}$$

$$r_s = R_{es}(D_1) \tag{ก.140}$$

$$g_{s1} = \left.\frac{\partial f_s\left(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1\right)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} \tag{ก.141}$$

$$g_{s1} = \frac{\partial}{\partial v_1}\left(\frac{v_s}{R_{es}(D_1)}\right)\Bigg|_{v_1=V_1} = 0 \tag{ก.142}$$

$$g_{s2} = \left.\frac{\partial f_s\left(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1\right)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \tag{ก.143}$$

$$g_{s2} = \frac{\partial}{\partial v_2}\left(\frac{v_s}{R_{es}(D_1)}\right)\Bigg|_{v_2=V_2} = 0 \tag{ก.144}$$

$$g_{s3} = \left.\frac{\partial f_s\left(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} \tag{ก.145}$$

$$g_{s3} = \frac{\partial}{\partial v_3}\left(\frac{v_s}{R_{es}(D_1)}\right)\Bigg|_{v_3=V_3} = 0 \tag{ก.146}$$

$$j_s = \left.\frac{\partial f_s\left(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.147}$$

$$j_s = \frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{V_s}{R_{es}(d_1)}\right)\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.148}$$

$$j_s = \left[\left(-\frac{V_s}{R_{es}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial R_{es}(d_1)}{\partial d_1}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.149}$$

$$j_s = \left[\left(-\frac{V_s}{R_{es}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{2L_{es}}{d_1^2 T_s}\right)\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.150}$$

$$j_s = \left[\left(-\frac{V_s}{R_{es}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_{es}}{T_s}\right)\left(-\frac{2}{d_1^3}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.151}$$

$$j_s = \left[\left(\frac{V_s}{R_{es}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_{es}}{d_1^2 T_s}\right)\left(\frac{2}{d_1}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.152}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$j_s = \left(\frac{V_s}{R_{es}(D_1)^2}\right)\left(R_{es}(D_1)\right)\left(\frac{2}{D_1}\right) \tag{ก.153}$$

$$j_s = \frac{2V_s}{R_{es}(D_1)D_1} \tag{ก.154}$$

$$j_s = \frac{2V_g}{R_{es}(D_1)D_1} \tag{ก.155}$$

ไดโอด D1

$$\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1\rangle_{T_s}}{R_{e3}(d_1)} = f_1\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{ก.156}$$

$$\begin{aligned} I_1 + \tilde{i}_1 = {} & f_1(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) + \tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_1(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s = V_s} \\ & + \tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_1(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1 = V_1} + \tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2 = V_2} \\ & + \tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3 = V_3} + \tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1 = D_1} \\ & + \text{higher-order nonlinear terms} \end{aligned} \tag{ก.157}$$

$$I_1 = f_1(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) = \frac{V_1}{R_{e3}(D_1)} \tag{ก.158}$$

$$\tilde{i}_1 = g_{1s}\tilde{v}_s + \frac{\tilde{v}_1}{r_1} + g_{12}\tilde{v}_2 + g_{13}\tilde{v}_3 + j_1\tilde{d}_1 \tag{ก.159}$$

$$g_{1s} = \left.\frac{\partial f_1(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s = V_s} \tag{ก.160}$$

$$g_{1s} = \frac{\partial}{\partial v_s}\left.\left(\frac{V_1}{R_{e3}(D_1)}\right)\right|_{v_s = V_s} = 0 \tag{ก.161}$$

$$\frac{1}{r_1} = \left.\frac{\partial f_1(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1 = V_1} \tag{ก.162}$$

$$\frac{1}{r_1} = \frac{\partial}{\partial v_1}\left.\left(\frac{v_1}{R_{e3}(D_1)}\right)\right|_{v_1 = V_1} \tag{ก.163}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{R_{e3}(D_1)} \tag{ก.164}$$

$$r_1 = R_{e3}(D_1) \tag{ก.165}$$

$$g_{12} = \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \tag{ก.166}$$

$$g_{12} = \frac{\partial}{\partial v_2}\left(\frac{V_1}{R_{e3}(D_1)}\right)\Bigg|_{v_2=V_2} = 0 \tag{ก.167}$$

$$g_{13} = \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} \tag{ก.168}$$

$$g_{13} = \frac{\partial}{\partial v_3}\left(\frac{V_1}{R_{e3}(D_1)}\right)\Bigg|_{v_3=V_3} = 0 \tag{ก.169}$$

$$j_1 = \left.\frac{\partial f_1(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.170}$$

$$j_1 = \frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{V_1}{R_{e3}(d_1)}\right)\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.171}$$

$$j_1 = \left[\left(-\frac{V_1}{R_{e3}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial R_{e3}(d_1)}{\partial d_1}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.172}$$

$$j_1 = \left[\left(-\frac{V_1}{R_{e3}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{2L_2}{d_1{}^2 T_s}\right)\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.173}$$

$$j_1 = \left[\left(-\frac{V_1}{R_{e3}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_2}{T_s}\right)\left(-\frac{2}{d_1{}^3}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.174}$$

$$j_1 = \left[\left(\frac{V_1}{R_{e3}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_2}{d_1{}^2 T_s}\right)\left(\frac{2}{d_1}\right)\right]\Bigg|_{d_1=D_1} \tag{ก.175}$$

$$j_1 = \left(\frac{V_1}{R_{e3}(D_1)^2}\right)\left(R_{e3}(D_1)\right)\left(\frac{2}{D_1}\right) \tag{ก.176}$$

$$j_1 = \frac{2V_1}{R_{e3}(D_1)D_1} \tag{ก.178}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด D2

$$\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_2\rangle_{T_s}}{(1-k)R_{e2}(d_1)} = f_2\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \tag{ก.179}$$

$$\begin{aligned} I_2 + \tilde{i}_2 = {} & f_2(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) + \tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_2(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \\ & + \tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_2(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} + \tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_2(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \\ & + \tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_2(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} + \tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_2(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \\ & + \text{higher-order nonlinear terms} \end{aligned} \tag{ก.180}$$

$$I_2 = f_2(V_s, V_1, V_2, V_3, D_1) = \frac{V_2}{(1-k)R_{e2}(D_1)} \tag{ก.181}$$

$$\tilde{i}_2 = g_{2s}\tilde{v}_s + g_{21}\tilde{v}_1 + \frac{\tilde{v}_2}{r_2} + g_{23}\tilde{v}_3 + j_2\tilde{d}_1 \tag{ก.182}$$

$$g_{2s} = \left.\frac{\partial f_2(v_s, V_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \tag{ก.183}$$

$$g_{2s} = \frac{\partial}{\partial v_s}\left.\left(\frac{V_2}{(1-k)R_{e2}(D_1)}\right)\right|_{v_s=V_s} = 0 \tag{ก.184}$$

$$g_{21} = \left.\frac{\partial f_2(V_s, v_1, V_2, V_3, D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} \tag{ก.185}$$

$$g_{21} = \frac{\partial}{\partial v_1}\left.\left(\frac{V_2}{(1-k)R_{e2}(D_1)}\right)\right|_{v_1=V_1} = 0 \tag{ก.186}$$

$$\frac{1}{r_2} = \left.\frac{\partial f_2(V_s, V_1, v_2, V_3, D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \tag{ก.187}$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{\partial}{\partial v_2}\left.\left(\frac{v_2}{(1-k)R_{e2}(D_1)}\right)\right|_{v_2=V_2} \tag{ก.188}$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{(1-k)R_{e2}(D_1)} \tag{ก.189}$$

$$r_2 = (1-k)R_{e2}(D_1) \tag{ก.190}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_{23} = \left.\frac{\partial f_2\left(V_s, V_1, V_2, v_3, D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} \tag{ก.191}$$

$$g_{23} = \frac{\partial}{\partial v_3}\left.\left(\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(D_1\right)}\right)\right|_{v_3=V_3} = 0 \tag{ก.192}$$

$$j_2 = \left.\frac{\partial f_2\left(V_s, V_1, V_2, V_3, d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.193}$$

$$j_2 = \frac{\partial}{\partial d_1}\left.\left(\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(d_1\right)}\right)\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.194}$$

$$j_2 = \left.\left[\left(-\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(d_1\right)^2}\right)\left(\frac{\partial R_{e2}(d_1)}{\partial d_1}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.195}$$

$$j_2 = \left.\left[\left(-\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(d_1\right)^2}\right)\left(\frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{2\sqrt{L_1L_2}}{d_1^{\,2}T_s}\right)\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.196}$$

$$j_2 = \left.\left[\left(-\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(d_1\right)^2}\right)\left(\frac{2\sqrt{L_1L_2}}{T_s}\right)\left(-\frac{2}{d_1^{\,3}}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.197}$$

$$j_2 = \left.\left[\left(\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(d_1\right)^2}\right)\left(\frac{2\sqrt{L_1L_2}}{d_1^{\,2}T_s}\right)\left(\frac{2}{d_1}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \tag{ก.198}$$

$$j_2 = \left(\frac{V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(D_1\right)^2}\right)\left(R_{e2}\left(D_1\right)\right)\left(\frac{2}{D_1}\right) \tag{ก.199}$$

$$j_2 = \frac{2V_2}{\left(1-k\right)R_{e2}\left(D_1\right)D_1} \tag{ก.200}$$

$$j_2 = \frac{2V_s}{R_{e2}(D_1)D_1} \tag{ก.201}$$

$$j_2 = \frac{2V_g}{R_{e2}(D_1)D_1} \tag{ก.202}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด D3

$$\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{1}{R_{e1}(d_1)}\frac{\langle v_s\rangle_{T_s}}{\langle v_3\rangle_{T_s}} = f_3\left(\langle v_s\rangle_{T_s}, \langle v_1\rangle_{T_s}, \langle v_2\rangle_{T_s}, \langle v_3\rangle_{T_s}, d_1\right) \quad \text{(ก.203)}$$

$$\begin{aligned} I_3 + \tilde{i}_3 = {} & f_3(V_s,V_1,V_2,V_3,D_1) + \tilde{v}_s \left.\frac{\partial f_3(v_s,V_1,V_2,V_3,D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \\ & + \tilde{v}_1 \left.\frac{\partial f_3(V_s,v_1,V_2,V_3,D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} + \tilde{v}_2 \left.\frac{\partial f_3(V_s,V_1,v_2,V_3,D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \\ & + \tilde{v}_3 \left.\frac{\partial f_3(V_s,V_1,V_2,v_3,D_1)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} + \tilde{d}_1 \left.\frac{\partial f_3(V_s,V_1,V_2,V_3,d_1)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \\ & + \text{higher-order nonlinear terms} \end{aligned} \quad \text{(ก.204)}$$

$$I_3 = f_3(V_s,V_1,V_2,V_3,D_1) = \frac{1}{R_{e1}(D_1)}\frac{V_s^2}{V_3} \quad \text{(ก.205)}$$

$$\tilde{i}_3 = g_{3s}\tilde{v}_s + g_{31}\tilde{v}_1 + g_{32}\tilde{v}_2 + \frac{\tilde{v}_3}{r_3} + j_3\tilde{d}_1 \quad \text{(ก.206)}$$

$$g_{3s} = \left.\frac{\partial f_3(v_s,V_1,V_2,V_3,D_1)}{\partial v_s}\right|_{v_s=V_s} \quad \text{(ก.207)}$$

$$g_{3s} = \frac{\partial}{\partial v_s}\left.\left(\frac{1}{R_{e1}(D_1)}\frac{v_s^2}{V_3}\right)\right|_{v_s=V_s} \quad \text{(ก.208)}$$

$$g_{3s} = \frac{2}{R_{e1}(D_1)}\frac{V_s}{V_3} \quad \text{(ก.209)}$$

$$g_{3s} = \frac{2}{R_{e1}(D_1)M(D_1)} \quad \text{(ก.210)}$$

$$g_{31} = \left.\frac{\partial f_3(V_s,v_1,V_2,V_3,D_1)}{\partial v_1}\right|_{v_1=V_1} \quad \text{(ก.211)}$$

$$g_{31} = \frac{\partial}{\partial v_1}\left.\left(\frac{1}{R_{e1}(D_1)}\frac{V_s^2}{V_3}\right)\right|_{v_1=V_1} = 0 \quad \text{(ก.212)}$$

$$g_{32} = \left.\frac{\partial f_3(V_s,V_1,v_2,V_3,D_1)}{\partial v_2}\right|_{v_2=V_2} \quad \text{(ก.213)}$$

$$g_{32} = \frac{\partial}{\partial v_2}\left.\left(\frac{1}{R_{e1}(D_1)}\frac{V_s^2}{V_3}\right)\right|_{v_2=V_2} = 0 \quad \text{(ก.214)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{r_3}=\left.\frac{\partial f_3\left(V_s,V_1,V_2,v_3,D_1\right)}{\partial v_3}\right|_{v_3=V_3} \quad \text{(ก.215)}$$

$$\frac{1}{r_3}=\frac{\partial}{\partial v_3}\left.\left(\frac{1}{R_{e1}\left(D_1\right)}\frac{V_s^{\,2}}{v_3}\right)\right|_{v_3=V_3} \quad \text{(ก.216)}$$

$$\frac{1}{r_3}=-\frac{V_s^{\,2}}{R_{e1}\left(D_1\right)V_3^{\,2}} \quad \text{(ก.217)}$$

$$r_3=\frac{R_{e1}\left(D_1\right)V_3^{\,2}}{V_s^{\,2}} \quad \text{(ก.218)}$$

$$r_3=R_{e1}\left(D_1\right)M\left(D_1\right) \quad \text{(ก.219)}$$

$$j_3=\left.\frac{\partial f_3\left(V_s,V_1,V_2,V_3,d_1\right)}{\partial d_1}\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.220)}$$

$$j_3=\frac{\partial}{\partial d_1}\left.\left(\frac{1}{R_{e1}\left(d_1\right)}\frac{V_s^{\,2}}{V_3}\right)\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.221)}$$

$$j_3=\left.\left[\left(-\frac{V_s^{\,2}}{V_3R_{e1}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial R_{e1}(d_1)}{\partial d_1}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.222)}$$

$$j_3=\left.\left[\left(-\frac{V_s^{\,2}}{V_3R_{e1}(d_1)^2}\right)\left(\frac{\partial}{\partial d_1}\left(\frac{2L_1}{d_1^{\,2}T_s}\right)\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.223)}$$

$$j_3=\left.\left[\left(-\frac{V_s^{\,2}}{V_3R_{e1}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_1}{T_s}\right)\left(-\frac{2}{d_1^{\,3}}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.224)}$$

$$j_3=\left.\left[\left(\frac{V_s^{\,2}}{V_3R_{e1}(d_1)^2}\right)\left(\frac{2L_1}{d_1^{\,2}T_s}\right)\left(\frac{2}{d_1}\right)\right]\right|_{d_1=D_1} \quad \text{(ก.225)}$$

$$j_3=\left(\frac{V_s^{\,2}}{V_3R_{e3}(d_1)^2}\right)\left(R_{e1}(D_1)\right)\left(\frac{2}{D_1}\right) \quad \text{(ก.226)}$$

$$j_3=\frac{2V_s}{M(D_1)R_{e3}(D_1)D_1} \quad \text{(ก.227)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างผลการตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 แผนภาพขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบดฟังก์ชันถ่ายโอน

รูปที่ ข.1 แผนภาพขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB

ข.2 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างผลการตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

```
%bode plot%
%power stage%
%Vin,min and Io,max%
j3=1.08;
D1=0.486;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

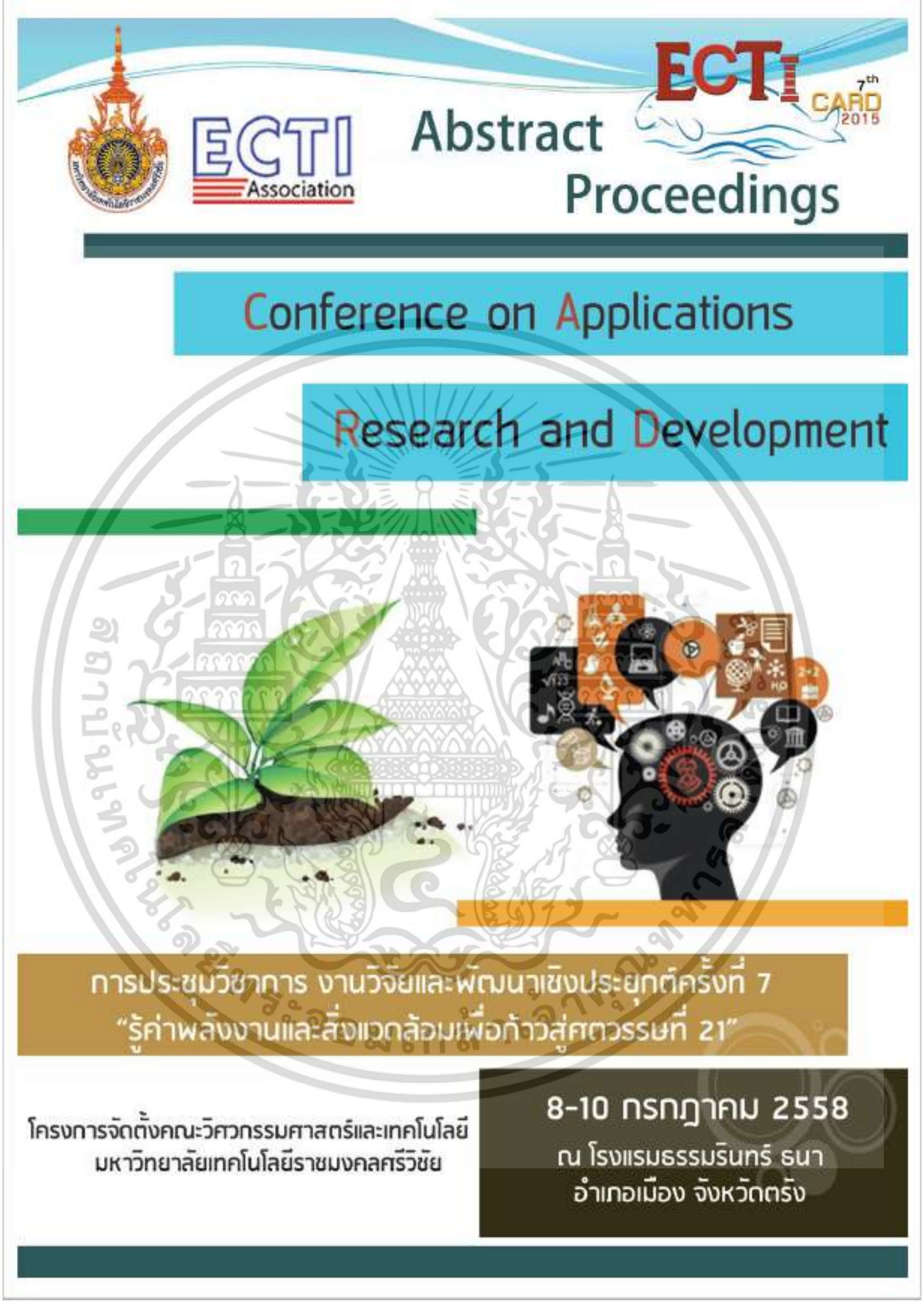
```
r3=69;
R=120;
C2=22e-6;
L1=100e-6;
Vg=20;
V=18;
Ts=10e-6;
num=[Vg^2*D1*Ts*R*r3];
den=[C2*R*r3*V*L1 V*L1*(R+r3)];
Gdv=tf(num,den)
%FmGdv(s)H(s)%
Gv=Gdv/14.112
bode(Gv)

%compensator%
Cc1=200e-12;
Cc2=33e-12;
Rc1=10e3;
Rc2=200e3;
K=Rc1*Cc2;
wz1=Rc2*Cc1;
wp2=Rc2*Cc2;
numc=[1 1/wz1];
denc=[K K/wp2 0];
Gc=tf(numc,denc)
%open-loop transfer function%
T=Gc*Gv
bode(Gv,Gc,T)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการฉบับสมบูรณ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7
ECTI-CARD 2015, Trang, Thailand

ดีซี – ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์กำลังต่ำที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวสำหรับแรงดันไฟฟ้าทางเข้าพิสัยกว้าง

Wide Input Range Low Power DC/DC Single – Switch Cascaded Flyback Converter

ภัสสร เครือน้ำคำ [1] นพดล มณีรัตน์ [1] นนทวัฒน์ จูลพงษ์ [1] และ ดอนสัณห์ ศรีประภา [2]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 E-mail: nandar_blue@hotmail.com
[2]ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ต.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิด ดีซี – ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวที่มีพิสัยของแรงดันไฟฟ้าทางเข้ากว้างตั้งแต่ 20V ถึง 120V โดยมีแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางออกต่ำ 18V/3W) ซึ่งทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode, DCM) ในการวิเคราะห์การทำงานได้ใช้วิธีศึกษาจากวงจรจำลองดีซีและแบบสัญญาณขนาดเล็กด้วยเทคนิคการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์ (Averaged Switch Model) และออกแบบวงจรควบคุมด้วยเทคนิค K – Factor ผลการทดลองวงจรที่สร้างขึ้นที่สภาวะคงตัว (Steady State) มีเปอร์เซ็นต์ไลน์เรกูเลชัน (Line Regulation) และโหลดเรกูเลชัน (Load Regulation) ต่ำ และผลตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response) ที่รวดเร็ว

คำสำคัญ- คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์, K – Factor, ดีซี – ดีซี คอนเวอร์เตอร์, คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว

Abstract

This research presents the design of wide input range DC-DC power supply using single-switch cascaded flyback converter with input voltage between 20-120V which generates 18V output voltage and low output power (3W) in discontinuous current mode (DCM). Functional analysis of circuit is analyzed the steady-state and transient response by using DC and AC small-signal modeling with averaged switch modeling technique. The control circuit is designed by using K – Factor technique. Experimental results are the low value of load and line regulations in steady state and fast transient response.

Keywords: Cascaded Flyback Converter, K – Factor, DC to DC Converter, Single Active Switch Converter

1. บทนำ

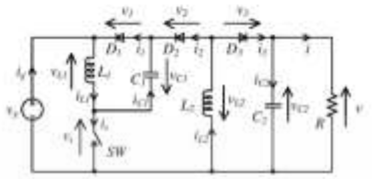
ในปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในระบบสูบน้ำทางการเกษตรเนื่องจากราคาที่ถูกลงและความสะดวกในการติดตั้ง ซึ่งนิยมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าปั๊มน้ำโดยมีวงจรคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมและแปลงพลังงานไฟฟ้า โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเพื่อจ่ายให้กับวงจรควบคุมของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันไฟฟ้าทางเข้ากว้างตั้งแต่ 20V ถึง 120V และต้องการแรงดันไฟฟ้าทางออก 18V/3W โดยทั่วไปนิยมใช้วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ แต่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางออกทำได้ลำบากเนื่องจากต้องใช้พิสัยของ Duty Cycle ที่กว้าง [1-2] ซึ่งวงจรดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดที่มีพิสัยของ Duty Cycle แคบกว่า [3-4]

งานวิจัยนี้ได้สร้างวงจรดีซี – ดีซีคาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ให้คุณลักษณะพิสัยกว้างจริง กำหนดให้วงจรทำงานในโหมด DCM โดยวิเคราะห์การทำงานด้วยวงจรจำลองดีซีและแบบสัญญาณขนาดเล็กด้วยเทคนิคการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์ แล้วนำวงจรจำลองนั้นมาออกแบบวงจรควบคุมด้วยวิธีแผนภาพโบเดและเทคนิค K – Factor วงจรที่สร้างขึ้นถูกนำไปทดสอบทั้งที่สภาวะคงตัว สภาวะการตอบสนองชั่วขณะ และวัดประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดและบทสรุปจะได้ถูกนำเสนอในบทความนี้

2. หลักการทำงาน

วงจร ดีซี – ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยวงจร ดีซี – ดีซี ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์สองวงจรต่ออนุกรมกัน วงจรแรกประกอบด้วยสวิตช์ SW, L_1, D_1 และ C_1 เมื่อสวิตช์ SW ทำงานเกิดการสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ L_1 และเมื่อสวิตช์ SW หยุดทำงานพลังงานสะสมที่ L_1 ถูกถ่ายเทไปยัง C_1 วงจรที่สองประกอบด้วยสวิตช์ SW, L_2, D_2 และ C_2 เมื่อสวิตช์ SW ทำงานพลังงานไฟฟ้าสะสมที่ C_1 จากวงจรแรกถูกถ่ายเทไปสะสมที่ L_2 และเมื่อสวิตช์ SW หยุดทำงานพลังงานสะสมที่ L_2 ถูกถ่ายเทไปยัง C_2 และโหลดความต้านทาน R การออกแบบวงจรเลือกวิธีการออกแบบสำหรับวงจรทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่อง (Continuous Current Mode, CCM) เนื่องจากวงจรถูกกำหนดให้ทำงานที่ขอบเขตระหว่างโหมด CCM และ DCM เมื่อวงจรทำงานที่พิกัด ซึ่งมีสมการของค่าคาบเวลาการสวิตช์ ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 วงจร ดีซี - ดีซี คาสเคดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์เดียว

Duty Cycle สูงสุด ค่าคาบเวลาสูงสุดขณะที่สวิตช์ *SW* ทำงาน และค่าเวลาต่ำสุดขณะสวิตช์ *SW* หยุดทำงานแสดงดังสมการที่ (1), (2) กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดทางด้านอินพุต กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดทางด้านอินพุต กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ L_1 และค่าของ L_1 แสดงดังสมการที่ (3), (4) และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ C_1 กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ L_2 และค่าของ L_2 แสดงดังสมการที่ (5), (6) ตามลำดับ

$$T_s = \frac{1}{f_s},\ d_{max} = \frac{1}{1+\sqrt{\frac{v_{o,max}}{V_s}}} \tag{1}$$

$$T_{on,max} = d_{max}T_s,\ T_{off,min} = T_s - T_{on,max} \tag{2}$$

$$\langle p_{in}\rangle_{max} = \frac{\langle p_{out}\rangle}{\eta},\ \langle i_{in}\rangle_{max} = \frac{\langle p_{in}\rangle_{max}}{\langle v_{in}\rangle_{min}} \tag{3}$$

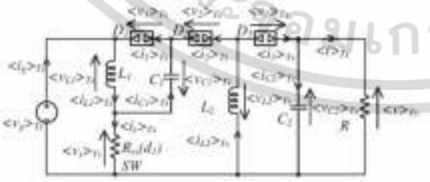
$$i_{L_1,max} = 2\frac{\langle i_{in}\rangle_{max}}{D_{max}},\ L_1 = \frac{\langle v_{in}\rangle_{min} T_{on,max}}{i_{L_1,max}} \tag{4}$$

$$v_{C_1} = \langle v_{in}\rangle_{min}\frac{T_{on,max}}{T_{off,min}} \tag{5}$$

$$i_{L_2,max} = \frac{2}{1-d_{max}}\frac{\langle p_{out}\rangle}{\langle v_{out}\rangle},\ L_2 = \langle v_{C_1}\rangle\frac{T_{on,max}}{i_{L_2,max}} \tag{6}$$

2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองของวงจร

การวิเคราะห์วงจรจำลองด้วยเทคนิคการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์[5-6] ได้แก่ *SW*, D_1, D_2 และ D_3 ให้เสมือนเป็นอุปกรณ์ชนิดเชิงเส้น โดยการเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์นั้นในระยะคาบเวลาของการสวิตช์แสดงดังแบบจำลองในรูปที่ 2 และได้สมการค่าเฉลี่ยที่อุปกรณ์สวิตช์แต่ละตัวดังสมการ (7) - (16) ตามลำดับ



รูปที่ 2 วงจรจำลองชนิดดีซี และเอซีแบบสัญญาณขนาดเล็ก

สวิตช์ *SW*

$$\langle v_s\rangle_{T_s} = \langle v_g\rangle_{T_s},\ \langle i_s\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{R_{es}(d_1)} \tag{7}$$

$$R_{es}(d_1) = \frac{2L_{es}}{d_1^2T_s},\ L_{es} = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}+\frac{1}{\sqrt{L_1L_2}}\right)} \tag{8}$$

ไดโอด D_1

$$\langle v_1\rangle_{T_s} = \langle v_{C_1}\rangle_{T_s},\ \langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{R_{e2}(d_1)} \tag{9}$$

$$\langle p_1\rangle_{T_s} = \langle v_1\rangle_{T_s}\langle i_1\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}^2}{R_{e1}(d_1)} \tag{10}$$

$$R_{e1}(d_1) = \frac{2L_1}{d_1^2T_s},\ R_{e2}(d_1) = \frac{2\sqrt{L_1L_2}}{d_1^2T_s} \tag{11}$$

ไดโอด D_2

$$\langle v_2\rangle_{T_s} = \langle v\rangle_{T_s} + \langle v_{C_1}\rangle_{T_s},\ \langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{R_{e2}(d_1)} \tag{12}$$

$$\langle p_2\rangle_{T_s} = \langle v_2\rangle_{T_s}\langle i_2\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}^2}{R_{e2}(d_1)} - \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}^2}{R_{e1}(d_1)} \tag{13}$$

ไดโอด D_3

$$\langle v_3\rangle_{T_s} = \langle v\rangle_{T_s},\ \langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}}{R_{e3}(d_1)} \tag{14}$$

$$\langle p_3\rangle_{T_s} = \langle v_3\rangle_{T_s}\langle i_3\rangle_{T_s} = \frac{\langle v_g\rangle_{T_s}^2}{R_{e3}(d_1)} \tag{15}$$

$$R_{e3}(d_1) = \frac{2L_2}{d_1^2T_s} \tag{16}$$

2.1.1 วงจรจำลองชนิดดีซี

วงจรจำลองชนิดดีซีวิเคราะห์โดยการพิจารณาให้ L_1 และ L_2 เสมือนลัดวงจรและพิจารณาให้ C_1 และ C_2 เสมือนเปิดวงจรได้วงจรจำลองแสดงดังในรูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ทางเข้า กำลังไฟฟ้าที่ทางออก และอัตราขยายของวงจรชนิดดีซีเมื่อพิจารณาให้วงจรไม่มีการสูญเสีย แสดงดังสมการที่ (17)-(19)

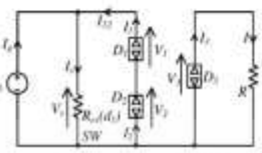
$$P_{in} = V_gI_g = V_g(I_1 - I_{L1}) = \frac{D_1^2T_s}{2L_1}V_g^2 \tag{17}$$

$$P_{out} = \frac{V^2}{R} \tag{18}$$

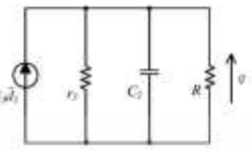
$$\frac{V}{V_g} = D_1\sqrt{\frac{RT_s}{2L_1}} = M(D_1) \tag{19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7
7th ECTI-CARD 2015, Trang, Thailand



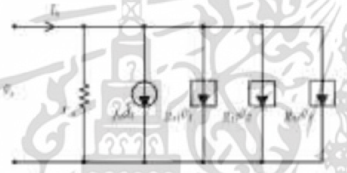
รูปที่ 3 วงจรจำลองชนิดดีซี



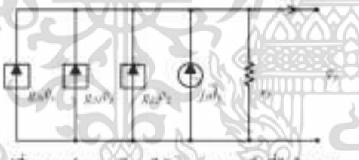
รูปที่ 6 วงจรจำลองความถี่ต่ำชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กที่ทางออก

2.1.2 วงจรจำลองชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็ก

วงจรจำลองชนิดนี้วิเคราะห์โดยการรบกวนการทำงานที่สภาวะคงตัวด้วยสัญญาณขนาดเล็ก และใช้วิธี Taylor Expansion ทำให้ได้วงจรสมมูลของสวิตช์ SW แสดงดังสมการที่ (20), (21) และที่ไดโอด D_s แสดงดังสมการที่ (22), (23) ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดแสดงดังในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 วงจรจำลองชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กที่สวิตช์ SW



รูปที่ 5 วงจรจำลองชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กที่ไดโอด D_s

ข้อมูลของวงจรสมมูลของสวิตช์ SW

$$\frac{1}{r_s}=\frac{1}{R_m(D_1)},\ j_s=\frac{2V_g}{R_m(D_1)D_1} \quad (20)$$

$$g_{s1}=g_{s2}=g_{sf}=0 \quad (21)$$

ข้อมูลของวงจรสมมูลของไดโอด D_s

$$\frac{1}{r_3}=-\frac{1}{R_{e1}(D_1)M(D_1)^2},\ j_3=\frac{2V_g}{M(D_1)R_{e1}(D_1)D_1} \quad (22)$$

$$g_{3s}=\frac{2}{R_{e1}(D_1)M(D_1)},\ g_{31}=g_{32}=0 \quad (23)$$

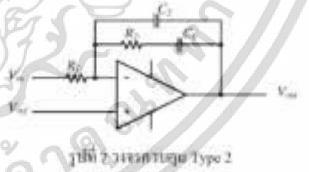
เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ย่านความถี่ต่ำซึ่งสามารถประเมินผลกระทบจากค่าของ $L_1 \approx 0,\ L_2 \approx 0$ ทำให้ได้วงจรสมมูลทางด้านออกแสดงดังในรูปที่ 6 และฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกกับ Duty Cycle ตามสมการที่ (24)

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}=[j_3(R\,\|\,r_3)]\left(\frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p}}\right),\ \omega_p=\frac{1}{(R\,\|\,r_3)C} \quad (24)$$

2.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมของวงจรดีซี – ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเก็บประจุถูกออกแบบด้วยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่โดยเป็นวงจรควบคุมชนิด Type - 2 แสดงดังในรูปที่ 7 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดเอซีสัญญาณขนาดเล็กแสดงดังสมการที่ (25) การคำนวณค่าของ R_1, R_2, C_1 และ C_2 ใช้เทคนิค K - Factor [7]

$$G_c(s)=\frac{s+\frac{1}{R_2C_1}}{sR_1C_2\left(1+\frac{1}{R_2C_2}\right)} \quad (25)$$



รูปที่ 7 วงจรควบคุม Type 2

3. การทดลองและผลการทดลอง

ผลการทดลองวงจรที่สภาวะคงตัวด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 20V ถึง 120V ที่โหลดต่างๆ ดังตารางที่ 1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกมีค่า 17.93-18.60V ซึ่งใกล้เคียงกับที่กำหนดไว้ โดยเปอร์เซ็นต์ไลน์เรกูเลชันระหว่าง 1.99-3.27% และเปอร์เซ็นต์โหลดเรกูเลชันระหว่าง 2.32-3.22%

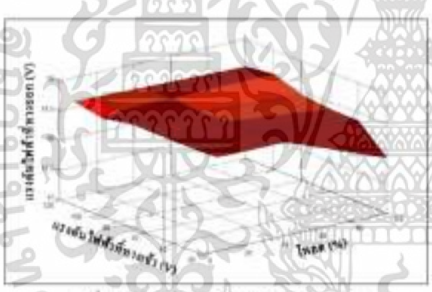
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7
ECTI-CARD 2015, Trang, Thailand

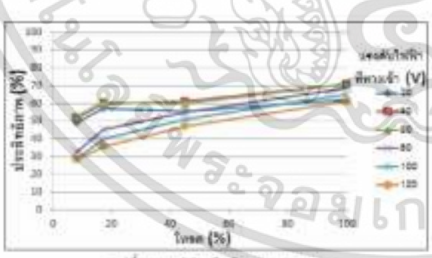
ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกและเปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น

แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (V)	โหลด (%)				ค่าโหลดเรกกูเลชั่นเฉลี่ย (%)
	8	17	45	100	
20	18.58	18.58	18.58	17.93	2.32
40	18.58	18.58	18.57	18.36	2.90
60	18.58	18.58	18.55	18.38	2.90
80	18.59	18.58	18.53	18.44	2.97
100	18.60	18.59	18.55	18.50	3.11
120	18.60	18.60	18.58	18.54	3.22
ค่าไลน์เรกกูเลชั่นเฉลี่ย (%)	3.27	3.25	3.11	1.99	

รูปที่ 8 แสดงค่าของไลน์เรกกูเลชั่นและโหลดเรกกูเลชั่น และรูปที่ 9 แสดงค่าของประสิทธิภาพที่โหลด 8% ถึง 100% ซึ่งค่าที่ได้มีค่าปานกลางเนื่องจากวงจรทำงานแบบ DCM ทำให้ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าในวงจรสูงซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น

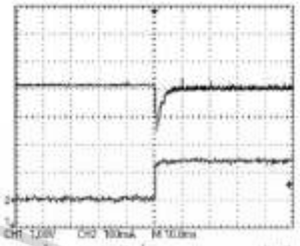


รูปที่ 8 กราฟไลน์เรกกูเลชั่นและโหลดเรกกูเลชั่น



รูปที่ 9 กราฟประสิทธิภาพของวงจร

ผลการตอบสนองชั่วขณะของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดทันทีทันใดที่แสดงในรูปที่ 11 โดยรูปกราฟบนแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก และรูปกราฟล่างแสดงกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกและกระแสไฟฟ้าที่โหลด

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์และสร้างวงจร ดีซี – ดีซี คาสเคดบักบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ซึ่งจากผลการทดลองแสดงถึงวงจรทำงานตามต้องการโดยมีค่าไลน์เรกกูเลชั่นและโหลดเรกกูเลชั่นเฉลี่ยต่ำ (<3.5%) ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 52.89% และการตอบสนองที่ดีต่อโหลดรวดเร็ว (<5 ms)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการสนับสนุนผู้วิจัยจากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Rogers Everett, "Understanding Buck Power Stages in Switch Mode Power Supplies," SLVA057 Application Report, Texas Instruments, March 1999.
[2] Daniel W. hart, "Power Electronics," McGraw – Hill, 2010.
[3] Bill Andreycak, "Elegantly Simple Off – Line Bias Supply for Very Low Power Application," App. Note U-149A, Unitrode.
[4] P. J. Athulith, Thomas Leena, Joy Nina, "PWM Switched Double Stage Buck Boost Converter with LC Filter for LED Lighting Applications," IJAREEIE Vol.3, Special Issue 5, December 2014.
[5] Robert W. Erickson, "Fundamental of Power Electronics," 2nded., Secaucus, NJ, USA : Kluwer Academic Publishers, 2000.
[6] Rogers Everett, "Understanding Buck – Boost Power Stages in Switch Mode Power Supplies," SLVA059A Application Report, Texas Instruments, March 1999.
[7] H. Dean Venable, "The K Factor : New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesis," Reference Reading 4, LINEAR TECHNOLOGY.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวภัสสร เครือน้ำคำ
วัน เดือน ปีเกิด	2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532
ที่อยู่	110 ถนนศรีเทวา ตำบลในเมือง อำเภอเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด 45000 โทร. 081-7087038
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2554

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้