

การจำลองแบบคอนเวอร์เตอร์แบบดีซีทูดีซี

Modeling of dc-dc Converters

DC-DC



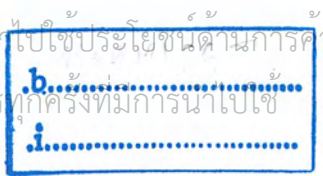
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขที่ 55652/ เลขทะเบียน 24 พ.ค. 2548 วันเดือนปี.....



การจำลองแบบคอนเวอร์เตอร์แบบดีซีทูดีซี  
(Modeling of dc-dc Converters)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองแบบคอนเวอร์เตอร์เต๋อแบบคิซีทูคิซี

Modeling of dc-dc Converters

โดย นาย ชศ เต็มอนันต์ 43010343

นาย วิมล ทีประเสริฐ 43010400

(.....)

ดร. ชนินทร์ บุญดุษฎีคุณานุกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองแบบคอนเวอร์เตอร์แบบดีซีทูดีซี  
(Modeling of dc-dc Converter)

โดย

นาย ยศ เต็มอนันต์ 43010343

นาย วิมล ทิประเสริฐ 43010400

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชนินทร์ บุญลักษณ์นุสรณ์

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองแบบคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีพื้นฐานทั้ง 3 ชนิด คือ บั๊กคอนเวอร์เตอร์ บูสต์คอนเวอร์เตอร์ และบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก โดยในการจำลองแบบได้เลือกใช้ 2 วิธี คือ วิธี state-space averaging กับวิธี PWM switch ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยวิธีทั้งสองพบว่าจะมีค่าเหมือนกันในกรณีของบั๊กคอนเวอร์เตอร์ และมีค่าใกล้เคียงกันมากในกรณีของบูสต์คอนเวอร์เตอร์และบั๊ก-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ regulator โดยจะแสดงการออกแบบกับบั๊กคอนเวอร์เตอร์ และบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ผลการทดลองยืนยันว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบ regulator ได้

ABSTRACT

This thesis studies modeling of basic DC-DC converters. The steady-state and small-signal dynamic models of a buck, boost, and buck-boost converters are derived. For the derivation of the small-signal dynamic models, the state-space averaging and PWM switch modeling approach are used. The resulting small-signal transfer functions derived by these two different approaches are similar for the buck converter and nearly identical in the case of the boost and buck-boost converters. Use of the small-signal dynamic models in regulator design is illustrated with the buck and boost converters. Experimental results are given to confirm the validity of these models in the regulator design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่1 บทนำ	1
บทที่2 การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี ในสถานะคงตัว	2
2.1 บทนำ	2
2.2 การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี ในสถานะคงตัวโดย ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์	3
2.2.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	3
2.2.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	10
2.2.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	15
บทที่3 การจำลองแบบของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี ในสถานะไดนามิกส์	21
3.1 บทนำ	21
3.2 วิธีการจำลองแบบของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี ในสถานะไดนามิกส์ ด้วยวิธี state-space	21
3.2.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	21
3.2.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	29
3.2.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	36
3.3 วิธีการจำลองแบบของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี ในสถานะไดนามิกส์ ด้วยวิธี Pulse Width Modulation	43
3.3.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	43
3.3.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	46
3.3.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	49
บทที่4 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซี	53
4.1 บทนำ	53
4.2 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธี state-space	53
4.2.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	53
4.2.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	59
4.2.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	65
4.3 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธี Pulse Width Modulation	72
4.3.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	78
4.3.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	87
4.4 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างวิธี Pulse width modulation และวิธี State - space	95
4.4.1 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค	95
4.4.2 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์	98
4.4.3 วงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค-บูสต์	101
บทที่ 5 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางราก	104
5.1 บทนำ	104
5.2 วงจรชดเชย	104
5.2.1 วงจรชดเชยแบบ P	105
5.2.2 วงจรชดเชยแบบ PI	105
5.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบโดยใช้วิธีเส้นทางราก (Root-Locus)	106
5.4 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางราก	107
5.4.1 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบัค โดยวงจรชดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรชดเชยแบบ P	107
5.4.2 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบัค โดยวงจรชดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรชดเชยแบบ PI	112
5.4.3 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบูสต์ โดยวงจรชดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรชดเชยแบบ PI	116
บทที่ 6 การทดลองผลการทดลองวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	121
6.1 บทนำ	121
6.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุท	121
6.2.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุทของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบัค	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
6.2.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุทของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบูสต์	122
6.3 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุทการทดสอบการตอบสนอง ของแรงดันเอาต์พุท	122
6.3.1 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุทของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบัค	122
6.3.2 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุทของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี-ดีซี แบบบูสต์	123
6.4 วิจัยณ์ผลการทดลอง	124
6.5 สรุปผลการทดลองการทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุท	125
ภาคผนวก	126
กิตติกรรมประกาศ	130
อ้างอิง	131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับตัวรีซิสเตอร์	2
รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัคในรูปของมอสเฟตและไดโอด	3
รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัคในรูปของสวิตช์	3
รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัคในรูปเมื่อมอสเฟตนำกระแส	4
รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัคในรูปเมื่อไดโอดนำกระแส	4
รูปที่ 2.6 Inductor voltage waveform	6
รูปที่ 2.7 Capacitor current waveform	7
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางด้านเอาต์พุต	7
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางด้านอินพุต	8
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัค	9
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัคในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน 1:D	9
รูปที่ 2.12 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	10
รูปที่ 2.13 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปของสวิตช์	11
รูปที่ 2.14 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อมอสเฟตนำกระแส	11
รูปที่ 2.15 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อไดโอดนำกระแส	12
รูปที่ 2.16 Inductor voltage waveform	12
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลทางด้านอินพุต	13
รูปที่ 2.18 Capacitor current waveform	13
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลทางด้านเอาต์พุต	14
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์	14
รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน D' : 1	15
รูปที่ 2.22 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัค-บูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	15
รูปที่ 2.23 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัค-บูสต์ในรูปของสวิตช์	16
รูปที่ 2.24 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัค-บูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส	16
รูปที่ 2.25 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบัค-บูสต์เมื่อไดโอดนำกระแส	17
รูปที่ 2.26 Inductor voltage waveform	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลทางด้านอินพุท	18
รูปที่ 2.28 Capacitor current waveform	19
รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลทางด้านเอาต์พุท	19
รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊ก-บูสต์	20
รูปที่ 2.31 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊ก-บูสต์	20
รูปหม้อแปลงอัตราส่วน $D' : 1$	
รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊กในรูปของมอสเฟตและไดโอด	21
รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊กในรูปของสวิตช์	22
รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊กเมื่อมอสเฟตนำกระแส	22
รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊กเมื่อไดโอดนำกระแส	22
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปแรก	28
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปกลาง	28
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปสุดท้าย	28
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊ก	29
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊กในรูปหม้อแปลง	29
อัตราส่วน $1 : D$	
รูปที่ 3.10 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	29
รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปของสวิตช์	30
รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อมอสเฟตนำกระแส	30
รูปที่ 3.13 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อไดโอดนำกระแส	30
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปแรก	35
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปกลาง	35
รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปสุดท้าย	35
รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์	36
รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบูสต์ในรูปหม้อแปลง	36
อัตราส่วน $D' : 1$	
รูปที่ 3.19 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊ก-บูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	36
รูปที่ 3.20 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี-คีซี แบบบั๊ก-บูสต์ในรูปของสวิตช์	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่3.21 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส	37
รูปที่3.22 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์เมื่อไดโอดนำกระแส	37
รูปที่3.23 วงจรสมมูลจากสมการที่3.24รูปแรก	42
รูปที่3.24 วงจรสมมูลจากสมการที่3.24รูปกลาง	42
รูปที่3.25 วงจรสมมูลจากสมการที่3.24รูปสุดท้าย	42
รูปที่3.26 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์	43
รูปที่3.27 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน $D' : 1$	43
รูปที่3.28 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัคในรูปของมอสเฟตและไดโอด	43
รูปที่3.29 รูปสัญญาณ $I_1$	44
รูปที่3.30 รูปสัญญาณ $V_1$	44
รูปที่3.31	45
รูปที่3.32 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัคในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน $1 : D$	46
รูปที่3.33 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	46
รูปที่3.34 รูปสัญญาณ $V_2$	46
รูปที่ 3.35 รูปสัญญาณ $i_2$	47
รูปที่3.36 วงจรสมมูลของสวิทช์ในกรอบเส้นประในรูปที่3.33 ของวงจรแปลงผัน แรงดันดิซี - ดิซีแบบบูสต์	48
รูปที่3.37 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน $D' : 1$	48
รูปที่3.38 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	49
รูปที่3.39 รูปสัญญาณ $V_1$ , $V_2$	49
รูปที่ 3.40 รูปสัญญาณ $I_1$ , $I_2$	49
รูปที่3.41 วงจรสมมูลของสวิทช์ในกรอบเส้นประในรูปที่3.38 ของวงจรแปลงผัน แรงดันดิซี - ดิซีแบบบัค-บูสต์	51
รูปที่3.42 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ในรูปหม้อแปลง อัตราส่วน $D' : D$	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัคในรูปของมอสเฟตและไดโอด	53
รูปที่ 4.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัคเมื่อมอสเฟตนำกระแส	53
รูปที่ 4.3 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัคเมื่อไดโอดนำกระแส	54
รูปที่ 4.4 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	59
รูปที่ 4.5 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อมอสเฟตนำกระแส	59
รูปที่ 4.6 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ในรูปเมื่อไดโอดนำกระแส	59
รูปที่ 4.7 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ในรูปของมอสเฟตและไดโอด	65
รูปที่ 4.8 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส	65
รูปที่ 4.9 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์เมื่อไดโอดนำกระแส	66
รูปที่ 4.10 วงจรสวิตช์	72
รูปที่ 4.11 PWM สวิตช์รูปแบบของหม้อแปลง	73
รูปที่ 4.12 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค เมื่อแทน PWM สวิตช์รูปแบบของหม้อแปลง	73
รูปที่ 4.14 วงจรสมมูลระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต	73
รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับควิตีไซเคิล	75
รูปที่ 4.16 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบูสต์ เมื่อแทน PWM สวิตช์รูปแบบของหม้อแปลง	78
รูปที่ 4.17 วงจรสวิตช์	78
รูปที่ 4.18 วงจรสมมูลเมื่อแทนด้วยสวิตช์	79
รูปที่ 4.19 วงจรสมมูลเมื่อแทนด้วยสวิตช์	83
รูปที่ 4.20 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ เมื่อแทน PWM สวิตช์รูปแบบของหม้อแปลง	87
รูปที่ 4.21 วงจรสมมูลเมื่อวิเคราะห์แบบดิซี	87
รูปที่ 4.22 วงจรสมมูลใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต	89
รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับควิตีไซเคิล	92
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมป้อนกลับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 5.2 Error Amplifier	105
รูปที่ 5.3 วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาดแบบ P	105
รูปที่ 5.4 วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาดแบบ PI	105
รูปที่ 5.5 เส้นทางการยกของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี – ดิซีแบบบัก	108
รูปที่ 5.6 กราฟโบลคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบัก โดยให้ $K_c=10$	109
รูปที่ 5.7 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบักเมื่อ $K_c=10$	109
รูปที่ 5.8 กราฟโบลคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบัก โดยให้ $K_c=100$	110
รูปที่ 5.9 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบักเมื่อ $K_c=100$	110
รูปที่ 5.10 กราฟโบลคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบัก โดยให้ $K_c=1000$	111
รูปที่ 5.11 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบักเมื่อ $K_c=1000$	111
รูปที่ 5.12 เส้นทางการยกของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี – ดิซีแบบบัก	113
รูปที่ 5.13 เส้นทางการยกของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบักเมื่อ $\omega_{z_c}=1000$	114
รูปที่ 5.14 กราฟโบลคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบักเมื่อ $\omega_{z_c} = 1000$ และ $\frac{k}{\omega_{z_c}} = 2$	115
รูปที่ 5.15 วงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีแบบบัก	116
รูปที่ 5.16 เส้นทางการยกของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี – ดิซีแบบบูสต์	117

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 5.17 เส้นทางการของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบวสต์เมื่อ $\omega_{z_c} = 1000$	118
รูปที่ 5.18 กราฟโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบวสต์เมื่อ $\omega_{z_c} = 1000$ และ $\frac{k}{\omega_{z_c}} = 2$	119
รูปที่ 5.19 วงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบวสต์	120
รูปที่ 6.1 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัก	123
รูปที่ 6.1 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบวสต์	124



## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัก ระหว่างวิธี state-space กับ วิธี Pulse Width Modulation	97
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบวสต์ ระหว่างวิธี state-space กับ วิธี Pulse Width Modulation	100
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัก - บวสต์ ระหว่างวิธี State – space กับ วิธี Pulse Width Modulation	103
ตารางที่ 6.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันคิซี-คิซี แบบบักโหมด CCM	121
ตารางที่ 6.2 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันคิซี-คิซี แบบบวสต์ในโหมด CCM	122



## บทที่ 1

### บทนำ

การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันแบบ ดีซี – ดีซี (DC – DC CONVERTER) มีประโยชน์ในหลายๆ ทาง คือ

1. เพื่อช่วยในการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันแบบ ดีซี – ดีซี พื้นฐาน ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ คือ
  - วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค (Buck Converter)
  - วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบูสต์ (Boost Converter)
  - วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค – บูสต์ (Buck – Boost Converter)

ซึ่งวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี พื้นฐานทั้ง 3 ตัวนี้เป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการพัฒนามาเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ (switch mode power supply) มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (power electronics) เช่น ในคอมพิวเตอร์, อุปกรณ์ที่ใช้ในสำนักงาน, อุปกรณ์ทางด้านการสื่อสาร รวมทั้งตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ เพราะว่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ขนาดเล็ก, น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูง

2. การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันแบบ ดีซี – ดีซี ช่วยในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ซึ่งในการออกแบบวงจรชดเชยจะทำโดยการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ในสถานะไดนามิกส์ แล้วนำไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรชดเชย โดยวงจรชดเชยที่ได้มาจากการออกแบบ จะนำไปทำการทดลองกับวงจรแปลงผันแรงดัน แล้วเก็บผลจากการทดลอง เพื่อดูว่าวงจรชดเชยที่ออกแบบมานั้น จะช่วยทำให้มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เมื่อกระแสเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลง

## บทที่ 2

### การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี ในสภาวะคงตัว

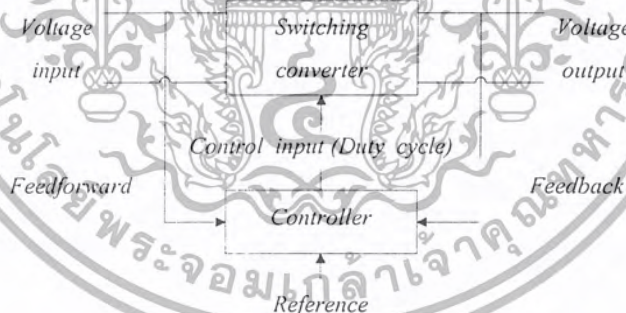
#### 2.1 บทนำ

วงจรแปลงผันแรงดันแบบ ดิซี – ดิซี คือวงจรทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนแปลงแรงดันดิซีอินพุท ให้ได้แรงดันดิซีเอาต์พุทในอีกระดับหนึ่ง หรือเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุทคงที่

ซึ่งวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี พื้นฐานมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี แบบบัก
2. วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี แบบบูสต์
3. วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี แบบบัก - บูสต์

โดยที่วงจรทั้ง 3 แบบได้อาศัยการทำงานของสวิตช์ได้แก่ มอสเฟตกำลัง (MOSFET) และ ไดโอดกำลัง (Diode) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปสัญญาณอินพุท ซึ่งทำให้ได้รูปสัญญาณใหม่แล้ว จึงนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้แรงดันค่าใหม่ และจากการทำงานของสวิตช์ ทำให้เกิดริปเปิล (ripple) เนื่องจากความถี่ในการสวิตช์ของวงจร ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกรองความถี่ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low – pass filter) ที่สร้างขึ้นจากตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุไฟฟ้า จึงจะได้แรงดันเอาต์พุท



รูปที่ 2.1 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุทกับดิซีไซเคิล

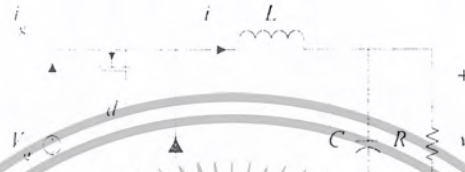
จากระบบจะพบว่า แรงดันดิซีเอาต์พุทมีความสัมพันธ์กับแรงดันอินพุทและดิซีไซเคิล (duty cycle) และเพื่อประสิทธิภาพในการแปลงผันแรงดันจึงทำการ Feedback และ Feedforward เข้ามาที่ตัวควบคุม และนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุท

โดยสิ่งที่เราจะศึกษาในบทนี้คือ การจำลองแบบของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี – ดิซี ในสภาวะคงตัวโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

## 2.2 การหาแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี ในสภาวะคงตัว โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

โดยในการหาแบบจำลองวงจรจริงๆ แล้วมีความซับซ้อนกว่านี้ แต่ในการจำลองแบบวงจร เราจำเป็นต้องใช้วงจรพื้นฐานเพื่อช่วยในการออกแบบพื้นฐานและง่ายต่อความเข้าใจ โดยวงจรที่นำมาศึกษามีการคิดความต้านทานที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำด้วย

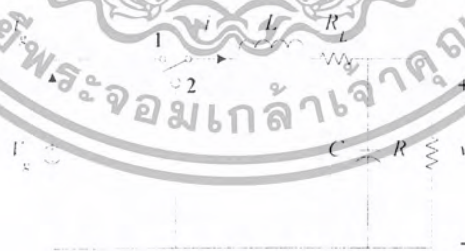
### 2.2.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัก



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบักในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัก (รูปที่ 2.2) เป็นวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี ที่ให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าแรงดันอินพุต ซึ่งในการจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.2 ถ้ามอสเฟตถึงนำกระแสแล้ว ไดโอดจะไม่นำกระแส และถ้ามอสเฟตไม่นำกระแสแล้ว ไดโอดจะนำกระแส ซึ่งทำให้สถานะภาพเหมือนสวิตช์แบบ Single pole double throws ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบักในรูปแบบสวิตช์

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำ ดังนั้นในแรงดันเอาต์พุตจึงประกอบด้วย  $V$  (dc component) กับ  $V_{\text{ripple}}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) ดังนั้น

$$v(t) = V + V_{\text{ripple}}$$

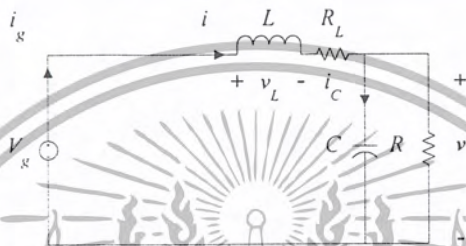
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่  $V_{\text{ripple}}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) มีค่าน้อยกว่า  $V$  มากๆ ดังนั้น

$$v(t) = V$$

จากรูปที่ 2.3 ทำการวิเคราะห์วงจร

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือ duty cycle



รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันแรงดัน คิวซี - คิวซี แบบบักเมื่อมอสเฟตนำกระแส

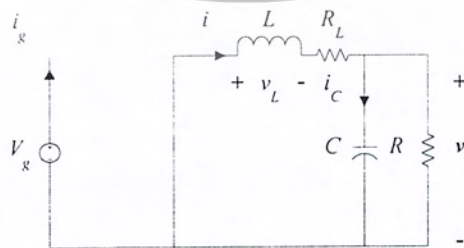
จากรูปที่ 2.4 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$v_L(t) = V_g - V - IR_L \quad (2.1)$$

$$i_C(t) = I - \frac{V}{R}$$

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย

$$D' = (1-D)$$



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันแรงดัน คิวซี - คิวซี แบบบักเมื่อไดโอดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$v_L(t) = -V - IR_L$$

$$i_C(t) = I - \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

โดยที่

$$v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$di(t) = \frac{1}{L} \times v_L(t) dt$$

$$\int_0^{T_s} di(t) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

$$i(T_s) - i(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

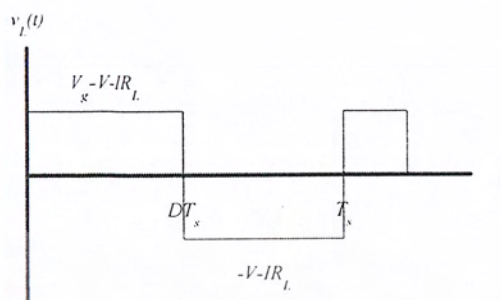
ในสภาวะคงตัว  $i(T_s) = i(0)$

$$0 = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

เราเรียกวิธีนี้ว่า Inductor volt second balance

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะพบว่าใน 1 คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ inductor voltage waveform เป็นดังรูปที่ 2.6





รูปที่ 2.6 Inductor voltage waveform

หาค่าเฉลี่ยของ Inductor voltage ( $v_L(t)$ ) โดยวิธี Inductor volt second balance

$$\langle v_L(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \quad (2.3)$$

$$0 = D[V_g - V - IR_L] + D'[-V - IR_L]$$

$$0 = DV_g - V - IR_L$$

โดยที่

$$i_C(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

$$dv(t) = \frac{1}{C} \times i_C(t) dt$$

$$\int_0^{T_s} dv(t) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C(t) dt$$

$$v(T_s) - v(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C(t) dt$$

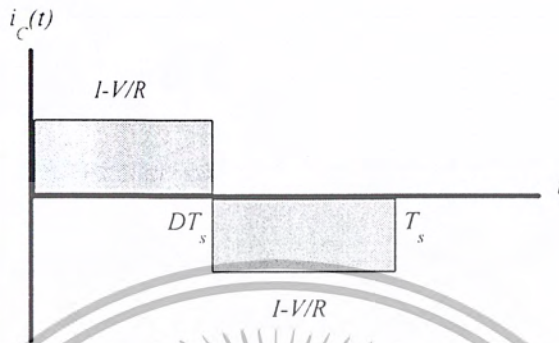
ในสถานะคงตัว  $v(T_s) = v(0)$

$$0 = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C(t) dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเรียกวิธีนี้ว่า Capacitor charge balance

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะพบว่าใน 1 คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ capacitor current waveform เป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 Capacitor current waveform

หาค่าเฉลี่ยของ Capacitor current ( $i_c(t)$ ) โดยวิธี Capacitor charge balance

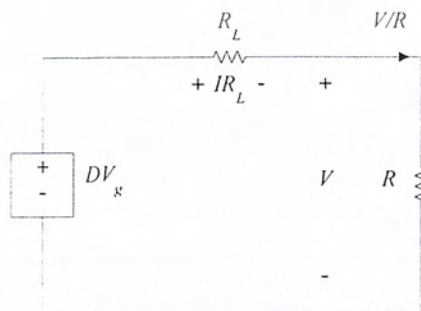
$$\langle i_c(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt$$

$$0 = D \left[ I - \frac{V}{R} \right] + D' \left[ -I + \frac{V}{R} \right]$$

$$0 = I - \frac{V}{R}$$

(2.4)

นำสมการที่ (2.3) กับ (2.4) มาเขียนในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางด้านเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 2.3 จะพบว่า  
ถ้าสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT_s$ ,

$$i_g = I$$

ถ้าสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T_s$ ,

$$i_g = 0$$

แล้วนำ  $i_g$  มาหาค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลา  $T_s$

$$I_g = \frac{DT_s [I] + D'T_s [0]}{T_s}$$

(2.5)

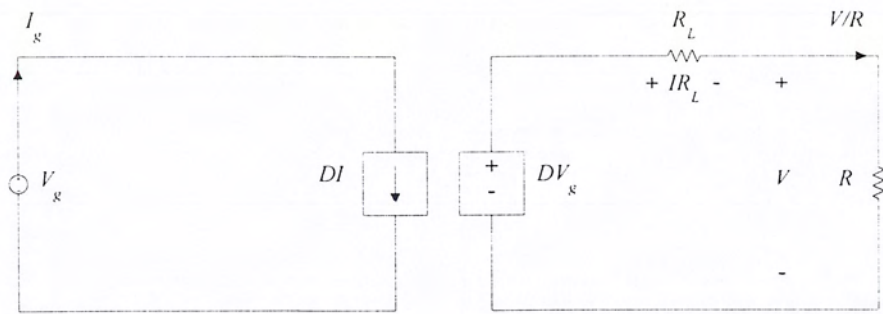
$$I_g = DI$$

นำสมการที่ (2.5) มาเขียนในรูปของวงจรมมูล ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรมมูลทางควานอินพุท

นำรูปที่ 2.8 และ 2.9 มาเขียนรวมกัน



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค

นำวงจรที่ได้มาเขียนในรูปของหม้อแปลงเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบ



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัคในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน 1:D

จากสมการที่ (2.3), (2.4), (2.5) นำมาแก้สมการ

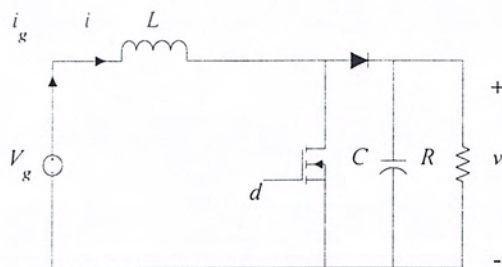
$$\begin{aligned}
 DV_g &= V + IR_L = V + \frac{V}{R}R_L \\
 &= V\left(\frac{R + R_L}{R}\right) \\
 V &= \frac{DV_g R}{R + R_L} \\
 \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{VI}{V_g I_g} \\
 &= \frac{VI}{V_g DI} = \frac{R}{R + R_L}
 \end{aligned}$$

และจากสมการที่ (2.3) ถ้าจำลองแบบโดยที่ไม่คิดความต้านทานที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำแล้ว

$$\begin{aligned}
 DV_g &= V + IR_L \\
 &= V + 0 \\
 \frac{V}{V_g} &= D
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจากวงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล - ดิจิทัล แบบบัก ถ้าไม่เกิดค่าความสูญเสียต่างๆ จะได้ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออินพุตเท่ากับค่าดีวตีไซเคิล

## 2.2.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล - ดิจิทัล แบบบัสต์

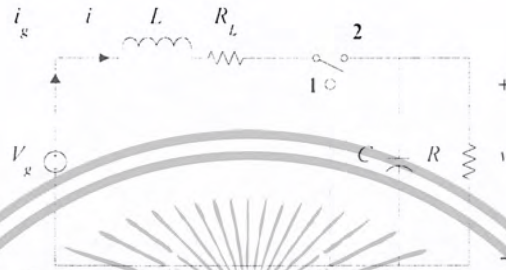


รูปที่ 2.12 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล - ดิจิทัล แบบบัสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบูสต์ (รูปที่ 2.12) เป็นวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี ที่ให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแรงดันอินพุต ซึ่งในการจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.12 ถ้ามอสเฟตกำลังนำกระแสแล้วไดโอดจะไม่นำกระแส และถ้ามอสเฟตไม่นำกระแสแล้วไดโอดจะนำกระแส ซึ่งทำให้สถานภาพเหมือนสวิตช์แบบ Single pole double throws ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบูสต์ในรูปแบบสวิตช์

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำ ดังนั้นในแรงดันเอาต์พุตจึงประกอบด้วย  $V$  (dc component) กับ  $V_{\text{ripple}}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) ดังนั้น

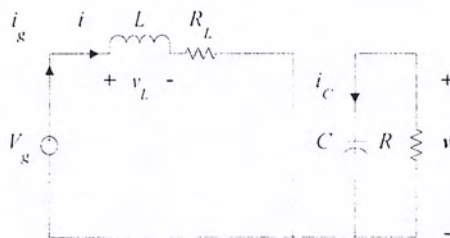
$$v(t) = V + V_{\text{ripple}}$$

แต่  $V_{\text{ripple}}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) มีค่าน้อยกว่า  $V$  มากๆ ดังนั้น

$$v(t) = V$$

จากรูปที่ 2.13 ทำการวิเคราะห์วงจร

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือคิวตี้ไซเคิล



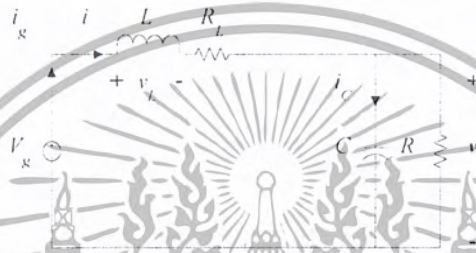
รูปที่ 2.14 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L(t) &= V_g - IR_L \\ i_C(t) &= -\frac{V}{R} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย  $D' = (1-D)$

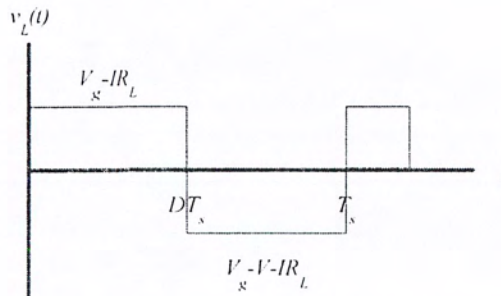


รูปที่ 2.15 วงจรแปลงผันแรงดัน คิวซี-คีสึ แบบบัสตเมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 2.15 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L(t) &= V_g - IR_L - V \\ i_C(t) &= I - \frac{V}{R} \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะพบว่าใน  $I$  คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ Inductor voltage waveform เป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Inductor voltage waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของ Inductor voltage

$$\begin{aligned} \langle v_L(t) \rangle &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \\ &= D[V_g - IR_L] + D'[V_g - V - IR_L] \end{aligned} \quad (2.8)$$

ในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ยของ Inductor voltage มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ (2.8)

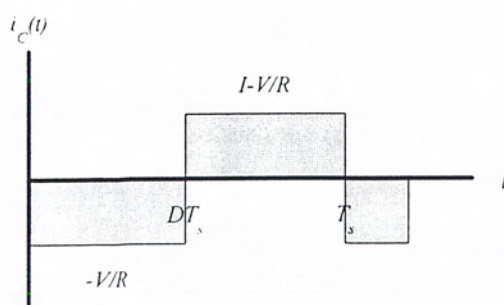
$$0 = V_g - IR_L - D'V \quad (2.9)$$

นำสมการที่ (2.9) มาเขียนในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลทางควอนตัม

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะพบว่าใน 1 คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ capacitor current waveform เป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Capacitor current waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของ Capacitor current

$$\begin{aligned} \langle i_C(t) \rangle &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C(t) dt \\ &= D \left[ -\frac{V}{R} \right] + D' \left[ I - \frac{V}{R} \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

ในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ยของ Capacitor current มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ (2.10)

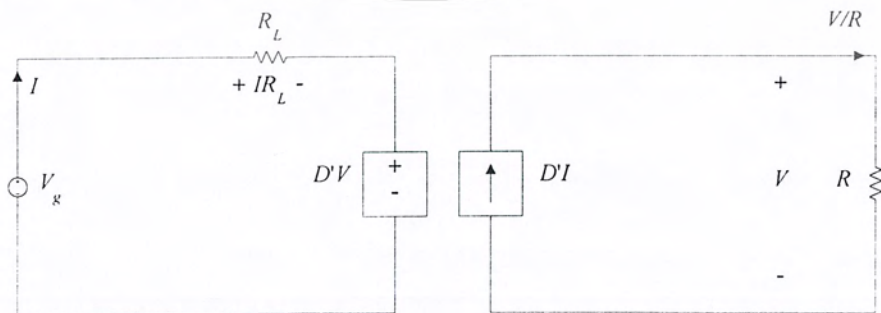
$$0 = -\frac{V}{R} + D'I \quad (2.11)$$

นำสมการที่ (2.11) มาเขียนในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.19



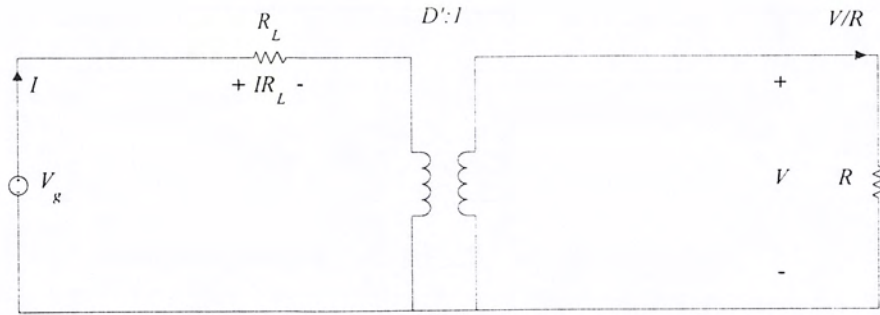
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลทางคานเอาท์พุท

นำรูปที่ 2.17 และ 2.19 มาเขียนรวมกัน



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซีแบบบัสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจรแปลงผันแรงดันแบบบัสต์ในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน  $D':1$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.11) นำมาแก้สมการ

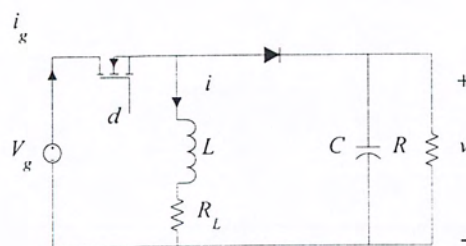
$$V = \frac{V_g}{D' \left( 1 + \frac{R_L}{D'^2 R} \right)}$$

$$I = \frac{V_g}{D'^2 R \left( 1 + \frac{R_L}{D'^2 R} \right)}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{VD'I}{V_g I} = \frac{VD'}{V_g \left( 1 + \frac{R_L}{D'^2 R} \right)}$$

จากวงจรสมมูลสามารถแก้สมการหาค่าประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์ในการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัสต์ได้

### 2.2.3 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัค - บัสต์



รูปที่ 2.22 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัค - บัสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงผันแรงดัน คิซี - คิซี แบบบัค - บูสต์ (รูปที่ 2.22) เป็นวงจรแปลงผันแรงดัน คิซี - คิซี ที่ให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าหรือมากกว่าแรงดันอินพุต ซึ่งในการจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.22 ถ้ามอสเฟตกำลังนำกระแสแล้วไดโอดจะไม่นำกระแส และถ้ามอสเฟตไม่นำกระแสแล้วไดโอดจะนำกระแส ซึ่งทำให้สถานะภาพเหมือนสวิตช์แบบ Single pole double throws ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรแปลงผันแรงดัน คิซี - คิซี แบบบัค - บูสต์ในรูปแบบสวิตช์

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำ ดังนั้นในแรงดันเอาต์พุตจึงประกอบด้วย  $V$  (dc component) กับ  $V_{ripple}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) ดังนั้น

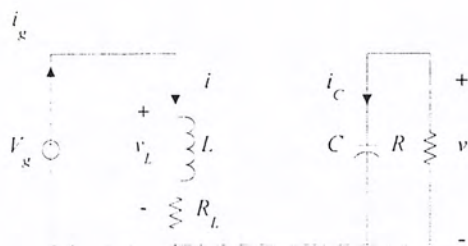
$$v(t) = V + V_{ripple}$$

แต่  $V_{ripple}$  (ที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์) มีค่าน้อยกว่า  $V$  มากๆ ดังนั้น

$$v(t) \approx V$$

จากรูปที่ 2.23 ทำการวิเคราะห์ที่วงจร

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือดิวตี้ไซเคิล



รูปที่ 2.24 วงจรแปลงผันแรงดัน คิซี - คิซี แบบบัค - บูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.24 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L(t) &= V_g - IR_L \\ i_C(t) &= -\frac{V}{R} \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย  $D' = (1-D)$



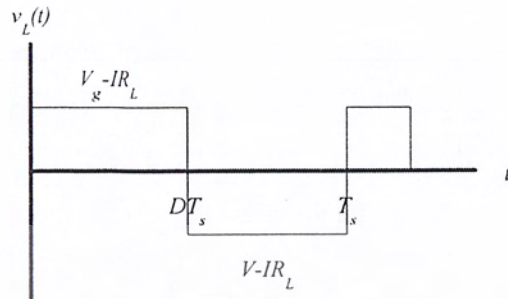
รูปที่ 2.25 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัก - บุสต์เมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 2.25 จะได้สมการ 2 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L(t) &= V - IR_L \\ i_C(t) &= I - \frac{V}{R} \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) จะพบว่าใน 1 คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ Inductor voltage waveform เป็นดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 Inductor voltage waveform

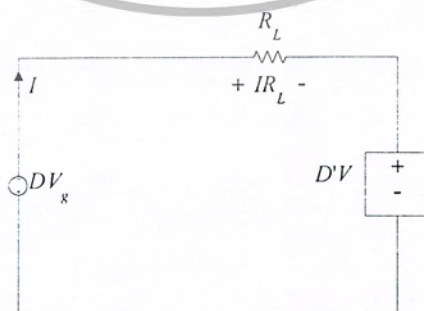
ค่าเฉลี่ยของ Inductor voltage

$$\begin{aligned} \langle v_L(t) \rangle &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \\ &= D[V_g - IR_L] + D'[-V - IR_L] \end{aligned} \tag{2.14}$$

ในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ยของ Inductor voltage มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ (2.14)

$$0 = DV_g - IR_L + D'V \tag{2.15}$$

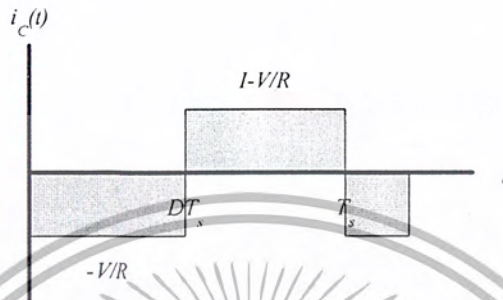
นำสมการที่ (2.15) มาเขียนในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลทางด้านอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) จะพบว่าใน 1 คาบเวลาของการสวิตช์ ( $T_s$ ) รูปสัญญาณ capacitor current waveform เป็นดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 Capacitor current waveform

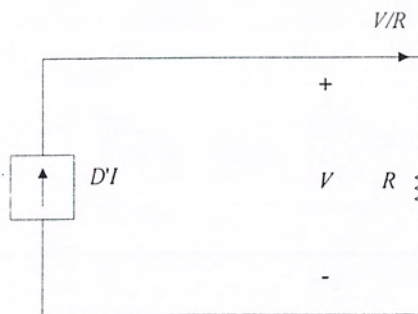
ค่าเฉลี่ยของ Capacitor current

$$\begin{aligned}
 \langle i_c(t) \rangle &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt \\
 &= D \left[ -\frac{V}{R} \right] + D' \left[ I - \frac{V}{R} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

ในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ยของ Capacitor current มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ (2.16)

$$0 = -\frac{V}{R} + D'I
 \tag{2.17}$$

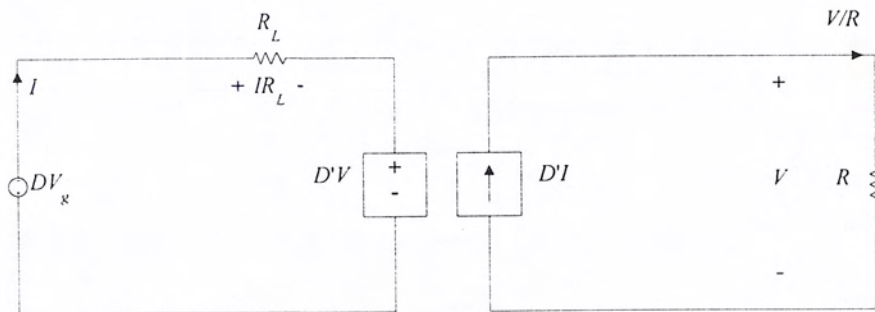
นำสมการที่ (2.17) มาเขียน ในรูปของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลทางค่านเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำรูปที่ 2.27 และ 2.29 มาเขียนรวมกัน



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลของวงจรของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัค - บูสต์



รูปที่ 2.31 วงจรแปลงผันแรงดันแบบบัค-บูสต์ในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน D':1

จากสมการที่ (2.15) และ (2.17) นำมาแก้สมการ

$$V = -\frac{DV_g}{RD'} + IR_L$$

$$I = -\frac{V}{RD'} + \frac{IR_L}{R}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = -\frac{VD'I}{DV_g I}$$

$$= -\frac{VD'}{DV_g} = 1 - \frac{IR_L D'}{DV_g}$$

จากวงจรสมมูลสามารถแก้สมการหาค่าประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์ในการออกแบบ

วงจรแปลงผันแรงดันแบบบัค - บูสต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การจำลองแบบวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ในสถานะไดนามิกส์

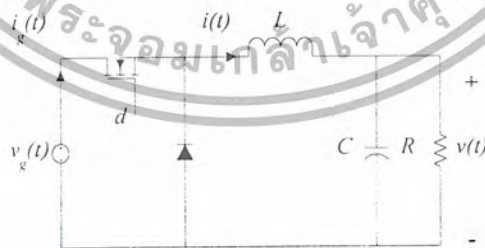
##### 3.1 บทนำ

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่า การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี มีจุดมุ่งหมายด้วยกันอยู่ 2 จุดมุ่งหมายคือ เพื่อช่วยเป็นพื้นฐานในการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันซึ่งได้มาจากการจำลองแบบวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ในสถานะคงตัวโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และอีกจุดมุ่งหมายคือ ช่วยในการออกแบบวงจรชดเชยแบบป้อนกลับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ เพื่อให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์มีการรักษาแรงดันเอาต์พุตคงที่และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในการออกแบบวงจรชดเชยแบบป้อนกลับนี้ จะได้มาจากการจำลองแบบวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ในสถานะไดนามิกส์ซึ่งจะกล่าวในบทนี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต อันได้แก่แรงดันอินพุตกับดิวตี้ไซเคิลของสวิตช์ (d) โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน แล้วจึงนำไปใช้ออกแบบวงจรชดเชยแบบป้อนกลับที่จะกล่าวในบทต่อไป ซึ่งหลักการในการหาแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี มีด้วยกันอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นำเสนอ มี 2 วิธี คือ

- 1) State – space
- 2) PWM

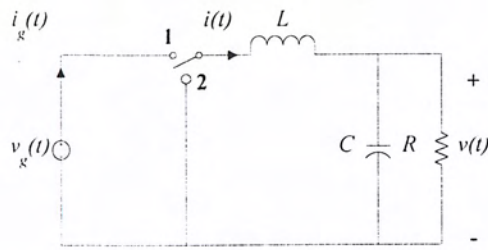
##### 3.2 วิธีการจำลองแบบวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี ในสถานะไดนามิกส์ด้วยวิธี State – space

###### 3.2.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัคในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซ์ - คัตซ์ แบบบักในรูปแบบสวิตช์

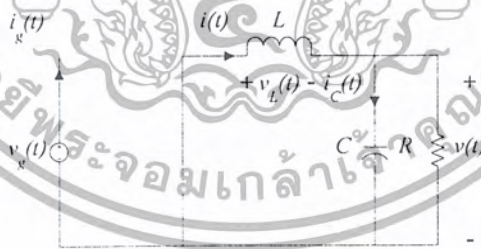
จากรูปที่ 3.2 ทำการวิเคราะห์ห้วงจร

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือคัตตี้ไซเคิล

รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซ์ - คัตซ์ แบบบักเมื่อมอสเฟตนำกระแส

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย

$$D' = (1-D)$$



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซ์ - คัตซ์ แบบบักเมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 3.3 จะได้สมการ 3 สมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v_L(t) &= v_g(t) - v(t) \\
 L \frac{di(t)}{dt} &= v_g(t) - v(t) \\
 i_C(t) &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 C \frac{dv(t)}{dt} &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 i_g(t) &= i(t)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

จากรูปที่ 3.4 จะได้สมการ 3 สมการคือ



$$\begin{aligned}
 v_L(t) &= -v(t) \\
 L \frac{di(t)}{dt} &= -v(t) \\
 i_C(t) &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 C \frac{dv(t)}{dt} &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 i_g(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

กำหนดค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{u}(t) &= \begin{bmatrix} v_g(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} i_g(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

State equation

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) \\
 \mathbf{y}(t) &= \mathbf{Cx}(t) + \mathbf{Eu}(t)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.1) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [v_g(t)]$$

$$[i_g(t)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + [0][v_g(t)]$$

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = [0]$$
(3.4)

จากสมการที่ (3.2) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [v_g(t)]$$

$$[i_g(t)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + [0][v_g(t)]$$

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉลี่ยดังนี้

$$A = A_1 D + A_2 D'$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -D \\ D & -D/R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -D' \\ D' & -D'/R \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix}$$

$$B = B_1 D + B_2 D'$$

$$B = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C_1 D + C_2 D'$$

$$C = \begin{bmatrix} D & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = E_1 D + E_2 D'$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

รบกวนสมการที่ (3.3) ด้วยสัญญาณขนาดเล็ความถี่ต่ำดังนี้

$$x(t) = X + \hat{x}(t)$$

$$u(t) = U + \hat{u}(t)$$

$$y(t) = Y + \hat{y}(t)$$

$$d(t) = D + \hat{d}(t)$$

$$d'(t) = D' + \hat{d}'(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
K \frac{d(X + \hat{x}(t))}{dt} &= \left( (D + \hat{d}(t))A_1 + (D' - \hat{d}'(t))A_2 \right) (X + \hat{x}(t)) \\
&\quad + \left( (D + \hat{d}(t))B_1 + (D' - \hat{d}'(t))B_2 \right) (U + \hat{u}(t)) \\
&= \left( DA_1 + \hat{d}(t)A_1 + DA_2 - \hat{d}'(t)A_2 \right) (X + \hat{x}(t)) \\
&\quad + \left( DB_1 + \hat{d}(t)B_1 + DB_2 - \hat{d}'(t)B_2 \right) (U + \hat{u}(t)) \\
&= \left( A + \hat{d}(t)(A_1 - A_2) \right) (X + \hat{x}(t)) + \left( B + \hat{d}(t)(B_1 - B_2) \right) (U + \hat{u}(t)) \\
K \frac{dX}{dt} + K \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= (AX + BU) + \left( A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) \right) + \left( (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right) \hat{d}(t) \\
&\quad + (A_1 - A_2)\hat{d}(t)\hat{x}(t) + (B_1 - B_2)\hat{d}(t)\hat{u}(t) \\
K \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) + \left( (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right) \hat{d}(t) \\
Y + \hat{y}(t) &= \left( (D + \hat{d}(t))C_1 + (D' - \hat{d}'(t))C_2 \right) (X + \hat{x}(t)) \\
&\quad + \left( (D + \hat{d}(t))E_1 + (D' - \hat{d}'(t))E_2 \right) (U + \hat{u}(t)) \\
&= \left( DC_1 + \hat{d}(t)C_1 + DC_2 - \hat{d}'(t)C_2 \right) (X + \hat{x}(t)) \\
&\quad + \left( DE_1 + \hat{d}(t)E_1 + DE_2 - \hat{d}'(t)E_2 \right) (U + \hat{u}(t)) \\
&= \left( C + \hat{d}(t)(C_1 - C_2) \right) (X + \hat{x}(t)) + \left( E + \hat{d}(t)(E_1 - E_2) \right) (U + \hat{u}(t)) \\
&= (CX + EU) + \left( C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) \right) + \left( (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right) \hat{d}(t) \\
&\quad + (C_1 - C_2)\hat{d}(t)\hat{x}(t) + (E_1 - E_2)\hat{d}(t)\hat{u}(t) \\
\hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) + \left( (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right) \hat{d}(t)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ State equation สองสมการคือ

$$\begin{aligned} K \frac{d \hat{x}(t)}{dt} &= A \hat{x}(t) + B \hat{u}(t) + \left\{ (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right\} \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t) + E \hat{u}(t) + \left\{ (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right\} \hat{d}(t) \end{aligned}$$

แก้สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} K \frac{d \hat{x}(t)}{dt} &= A \hat{x}(t) + B \hat{u}(t) + \left\{ (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right\} \hat{d}(t) \\ (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & +1 \\ 1 & -1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -0 \\ 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_g \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d}(t)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t) + E \hat{u}(t) + \left\{ (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right\} \hat{d}(t) \\ (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U &= \begin{bmatrix} 1 & -0 & 0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -0 \\ 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ \end{bmatrix} \\ &= [I] \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_g(t) \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}(t) \\ \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.6) และ (3.7) เขียนให้อยู่ในรูปสเกล่าได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L \frac{d \hat{i}(t)}{dt} = -\hat{v}(t) + D \hat{v}_g(t) + V_g \hat{d}(t) \tag{3.8}$$

$$C \frac{d \hat{v}(t)}{dt} = \hat{i}(t) - \frac{\hat{v}(t)}{R}$$

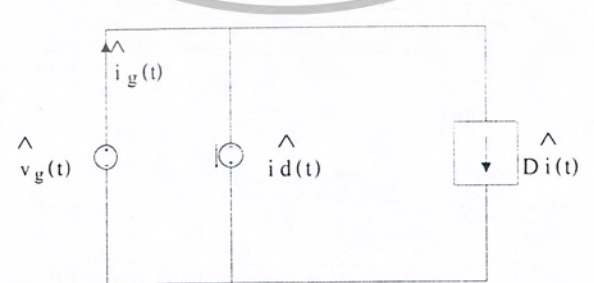
$$\hat{i}_g(t) = D \hat{i}(t) + \hat{d}(t)$$

จากสมการที่ (3.8) นำมาเขียนวงจรสมมูล ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปแรก

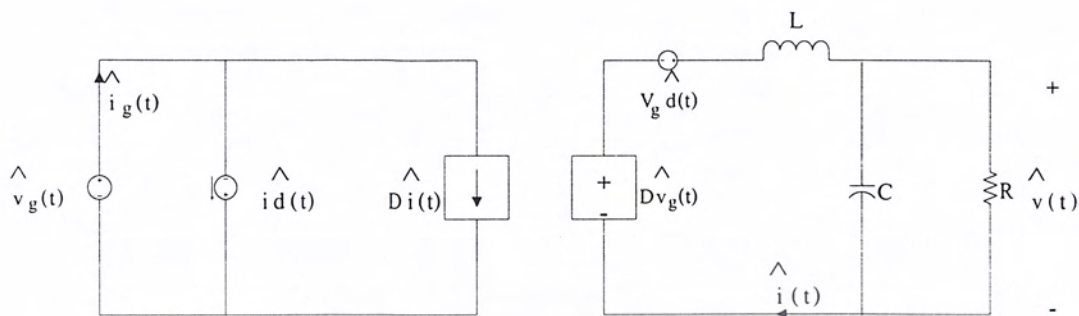
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปกลาง



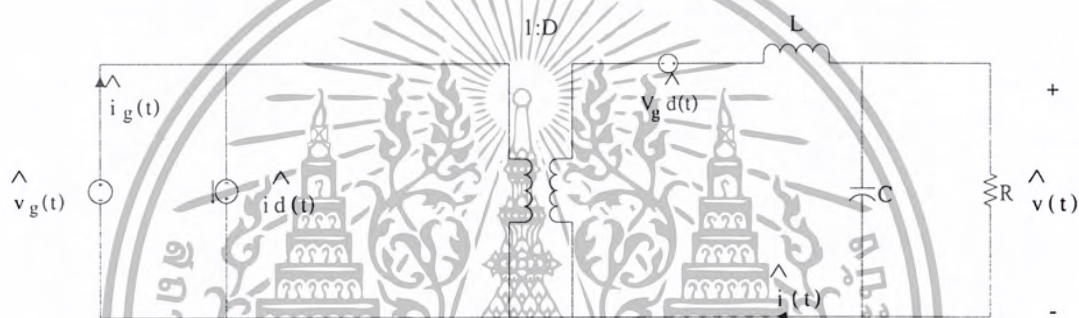
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.8 รูปสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำรูปที่ 3.5, 3.6, 3.7 มาเขียนรวมกัน ได้ดังรูปที่ 3.8

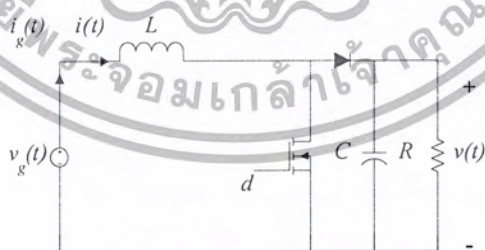


รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซีแบบบัก



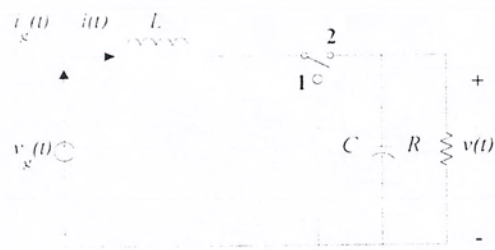
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซีแบบบักในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน 1:D

### 3.2.2 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบูสต์



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซีแบบบูสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี้ - ดิซี้ แบบบูสต์ในรูปแบบสวิตช์

จากรูปที่ 3.11 ทำการวิเคราะห์ห้วงจร

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือดิวตีไซเคิล



รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี้ - ดิซี้ แบบบูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย

$$D' = (1-D)$$



รูปที่ 3.13 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี้ - ดิซี้ แบบบูสต์เมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 3.12 จะได้สมการ 3 สมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v_L(t) &= v_g(t) \\
 L \frac{di(t)}{dt} &= v_g(t) \\
 i_C(t) &= -\frac{v(t)}{R} \\
 C \frac{dv(t)}{dt} &= -\frac{v(t)}{R} \\
 i_g(t) &= i(t)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

จากรูปที่ 3.13 จะได้สมการ 3 สมการคือ

$$\begin{aligned}
 v_L(t) &= v_g(t) = v(t) \\
 L \frac{di(t)}{dt} &= v_g(t) - v(t) \\
 i_C(t) &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 C \frac{dv(t)}{dt} &= i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 i_g(t) &= i(t)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

กำหนดค่าแอมพลิจูดต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{u}(t) &= \begin{bmatrix} v_g(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} i_g(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

State equation

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\
 \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{u}(t)
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.9) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

$$i_g(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/R \end{bmatrix} \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \\ D_1 &= \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.10) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

$$i_g(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \\ B_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \\ D_2 &= \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉลี่ยดังนี้

$$A = A_1 D + A_2 D'$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -D/R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -D' \\ D' & -D'/R \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -D' \\ D' & -1/R \end{bmatrix}$$

$$B = B_1 D + B_2 D'$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C_1 D + C_2 D'$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = E_1 D + E_2 D'$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

รวมความสัมพันธ์ (3.14) ด้วยสัญญาณขนาดเล็กลงที่ตัวตั้งนี้

$$\hat{x}(t) = X + \hat{x}(t)$$

$$\hat{u}(t) = U + \hat{u}(t)$$

$$\hat{y}(t) = Y + \hat{y}(t)$$

$$\hat{d}(t) = D + \hat{d}(t)$$

$$\hat{d}'(t) = D' + \hat{d}'(t)$$

จะได้ State equation สองสมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} K \frac{d \hat{x}(t)}{dt} &= A \hat{x}(t) + B \hat{u}(t) + \left( (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right) \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t) + E \hat{u}(t) + \left( (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right) \hat{d}(t) \end{aligned}$$

แก้สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} K \frac{d \hat{x}(t)}{dt} &= A \hat{x}(t) + B \hat{u}(t) + \left\{ (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U \right\} \hat{d}(t) \\ (A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U &= \begin{bmatrix} 0 & 0+1 \\ 0-1 & -1/R + 1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-1 \\ 0-0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} V \\ -I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -D' \\ D' & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V \\ -I \end{bmatrix} \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t) + E \hat{u}(t) + \left\{ (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U \right\} \hat{d}(t) \\ (C_1 - C_2)X + (E_1 - E_2)U &= \begin{bmatrix} 1-1 & 0-0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0-0 \\ 0-0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.15)$$

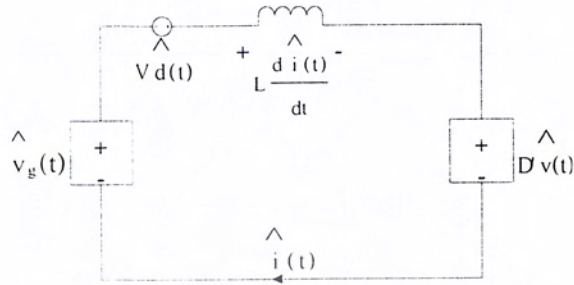
$$\begin{bmatrix} \hat{i}_g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \end{bmatrix} \hat{d}(t)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) เขียนให้อยู่ในรูปสเกล่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L \frac{d \hat{i}(t)}{dt} &= -D' \hat{v}(t) + \hat{v}_g(t) + V \hat{d}(t) \\ C \frac{d \hat{v}(t)}{dt} &= D' \hat{i}(t) - \frac{\hat{v}(t)}{R} - I \hat{d}(t) \\ \hat{j}_g(t) &= \hat{i}(t) \end{aligned} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.16) นำมาเขียนวงจรสมมูล ได้ดังนี้



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปแรก

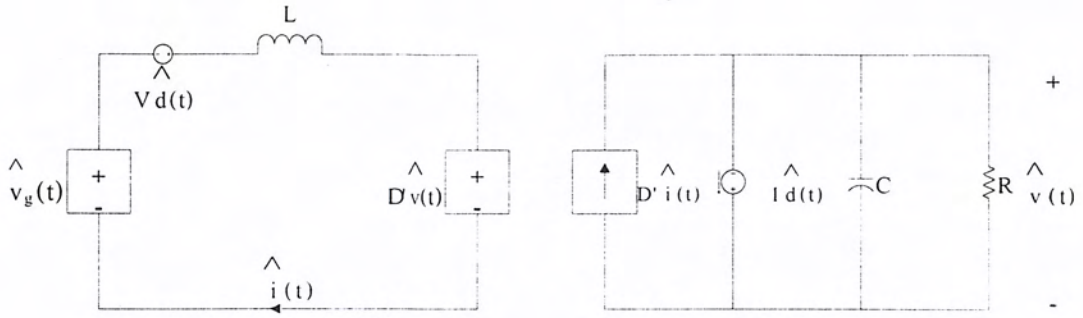


รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปกลาง

รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.16 รูปสุดท้าย

นำรูปที่ 3.14, 3.15, 3.16 มาเขียนรวมกัน ได้ดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คัตซี - คัตซีแบบบูสต์

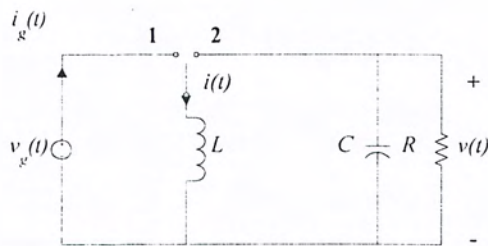


รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบูสต์ในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน D':1

### 3.2.3 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซี - คัตซี แบบบัก - บูสต์



รูปที่ 3.19 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซี - คัตซีแบบบัก - บูสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

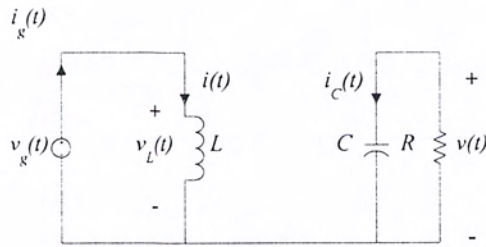


รูปที่ 3.20 วงจรแปลงผันแรงดัน คัตซี - คัตซีแบบบัก - บูสต์ในรูปแบบสวิตช์

จากรูปที่ 3.20 ทำการวิเคราะห์ห้วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 มอสเฟตนำกระแสเป็นเวลา  $DT$  โดย  $D$  คือดิวตี้ไซเคิล



รูปที่ 3.21 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัค - บุสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 มอสเฟตไม่นำกระแส ไดโอดนำกระแสเป็นเวลา  $D'T$  โดย  $D' = (1-D)$



รูปที่ 3.22 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัค - บุสต์เมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 3.21 จะได้สมการ 3 สมการคือ


$$\begin{aligned} v_L(t) &= v_g(t) \\ L \frac{di(t)}{dt} &= v_g(t) \\ i_c(t) &= \frac{v(t)}{R} \\ C \frac{dv(t)}{dt} &= -\frac{v(t)}{R} \\ i_g(t) &= i(t) \end{aligned} \quad (3.17)$$

จากรูปที่ 3.22 จะได้สมการ 3 สมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v_L(t) &= v(t) \\
 L \frac{di(t)}{dt} &= v(t) \\
 i_C(t) &= -i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 C \frac{dv(t)}{dt} &= -i(t) - \frac{v(t)}{R} \\
 i_g(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

กำหนดค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้



$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{u}(t) &= \begin{bmatrix} v_g(t) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} i_g(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

State equation

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\
 \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{u}(t)
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

จากสมการที่ (3.17) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(t) \\
 \begin{bmatrix} i_g(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} v_g(t)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/R \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.18) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} i_g(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(t)$$

จะได้ค่าเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1/R \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.20) และ (3.21) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉื่อยดังนี้

$$A = A_1 D + A_2 D'$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -D/R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & D' \\ D' & -D'/R \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & D' \\ D' & -D'/R \end{bmatrix}$$

$$B = B_1 D + B_2 D'$$

$$B = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C_1 D + C_2 D'$$

$$C = \begin{bmatrix} D & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = E_1 D + E_2 D'$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

รบกวนสมการที่ (3.19) ด้วยสัญญาณขนาดเล็ความถี่ดังนี้

$$\hat{x}(t) = X + x(t)$$

$$\hat{u}(t) = U + u(t)$$

$$\hat{y}(t) = Y + y(t)$$

$$\hat{d}(t) = D + d(t)$$

$$\hat{d}'(t) = D' + d'(t)$$

จะได้ State equation สองสมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \hat{K} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}\hat{u}(t) + \left\{ (\hat{A}_1 - \hat{A}_2)\hat{x} + (\hat{B}_1 - \hat{B}_2)\hat{u} \right\} \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= \hat{C}\hat{x}(t) + \hat{E}\hat{u}(t) + \left\{ (\hat{C}_1 - \hat{C}_2)\hat{x} + (\hat{E}_1 - \hat{E}_2)\hat{u} \right\} \hat{d}(t) \end{aligned}$$

แก้สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{K} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}\hat{u}(t) + \left\{ (\hat{A}_1 - \hat{A}_2)\hat{x} + (\hat{B}_1 - \hat{B}_2)\hat{u} \right\} \hat{d}(t) \\ (\hat{A}_1 - \hat{A}_2)\hat{x} + (\hat{B}_1 - \hat{B}_2)\hat{u} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g \\ \hat{v}_g \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & D' \\ D' & -1/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \hat{v}_g(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\hat{v} + \hat{v}_g \\ \hat{v} \end{bmatrix} \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= \hat{C}\hat{x}(t) + \hat{E}\hat{u}(t) + \left\{ (\hat{C}_1 - \hat{C}_2)\hat{x} + (\hat{E}_1 - \hat{E}_2)\hat{u} \right\} \hat{d}(t) \\ (\hat{C}_1 - \hat{C}_2)\hat{x} + (\hat{E}_1 - \hat{E}_2)\hat{u} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -0 \\ 0 & -0 & 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g \\ \hat{v}_g \end{bmatrix} \\ &= [\hat{I}] \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_g(t) \\ \hat{v}_g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_g(t) \\ \hat{v}_g(t) \end{bmatrix} + [\hat{I}] \hat{d}(t)$$

จากสมการที่ (3.22) และ (3.23) เขียนให้อยู่ในรูปสเกล่าได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L \frac{d \hat{i}(t)}{dt} = D' \hat{v}(t) + D \hat{v}_g(t) + (-V + V_g) \hat{d}(t) \tag{3.24}$$

$$C \frac{d \hat{v}(t)}{dt} = D' \hat{i}(t) - \frac{\hat{v}(t)}{R} + I \hat{d}(t)$$

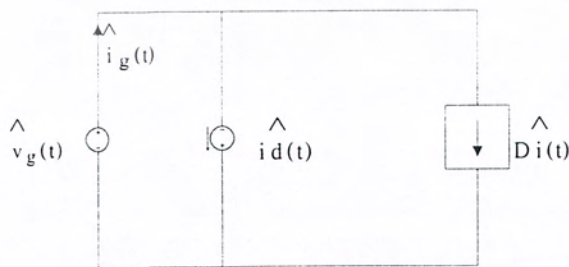
$$\hat{i}_g(t) = D \hat{i}(t) + I \hat{d}(t)$$

จากสมการที่ (3.24) นำมาเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.24 รูปแรก

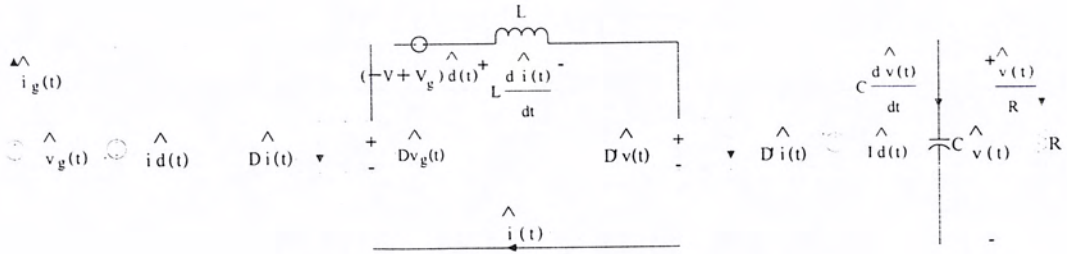
รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.24 รูปกลาง



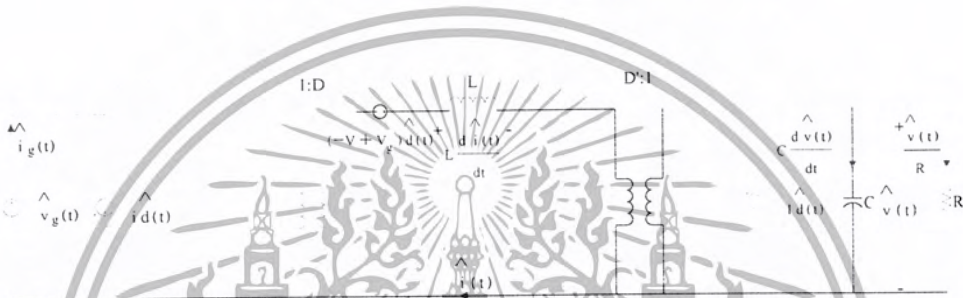
รูปที่ 3.25 วงจรสมมูลจากสมการที่ 3.24 รูปสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำรูปที่ 3.5, 3.6, 3.7 มาเขียนรวมกัน ได้ดังรูปที่ 3.8



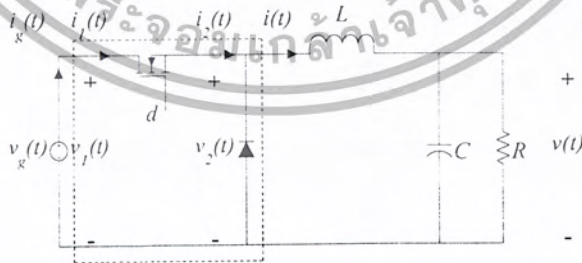
รูปที่ 3.26 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซีแบบบัค-บูสต์



รูปที่ 3.27 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบัค - บูสต์ในรูปของแปลงอัตราส่วน 1:D และอัตราส่วน D:1

### 3.3 วิธีการจำลองแบบวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี ในสถานะไดนามิกส์ด้วยวิธี Pulse width modulation

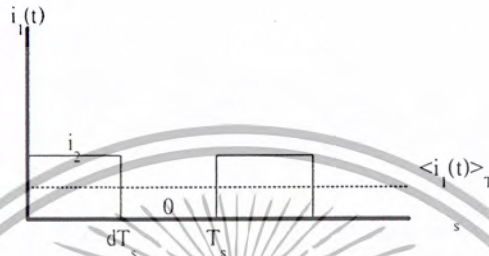
#### 3.3.1 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบัค



รูปที่ 3.28 วงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบัคในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.28 เมื่อมอสเฟตนำกระแส  $i_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $i_2$  ,  $v_2$  จะมีค่าเท่ากับ  $v_1$  และเมื่อมอสเฟตไม่นำกระแส  $i_1$  และ  $v_2$  จะมีค่าเท่ากับ 0 นำความสัมพันธ์มาเขียนรูปสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.29 และ 3.30



รูปที่ 3.29 รูปสัญญาณของ  $i_1$



รูปที่ 3.30 รูปสัญญาณของ  $v_2$

จากรูปที่ 3.29 ค่าเฉลี่ยของ  $i_1$  มีค่า

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle i_2(t) \rangle_{T_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการรบกวนสัญญาณ

$$\begin{aligned} \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] &= \left[ D + \hat{d}(t) \right] \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] \\ \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] &= D \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] + I_2 \hat{d}(t) + \hat{d}(t) \hat{i}_2(t) \\ \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] &= D \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] + I_2 \hat{d}(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

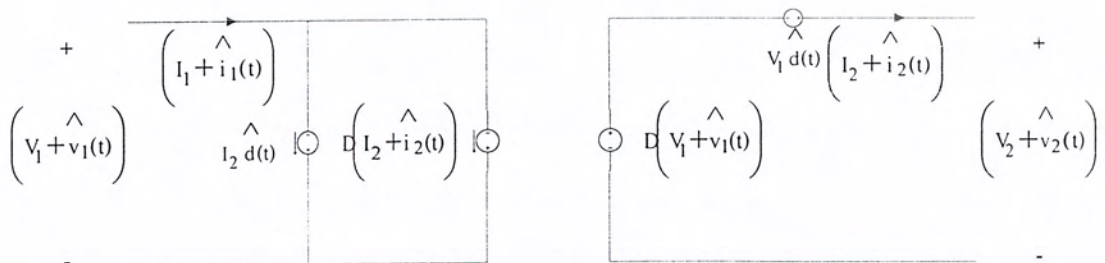
จากรูปที่ 3.30 ค่าเฉลี่ยของ  $v_2$  มีค่า

$$\langle v_2(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle v_1(t) \rangle_{T_s}$$

ทำการรบกวนสัญญาณ

$$\begin{aligned} \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] &= \left[ D + \hat{d}(t) \right] \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] \\ \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] &= D \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] + V_1 \hat{d}(t) + \hat{d}(t) \hat{v}_1(t) \\ \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] &= D \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] + V_1 \hat{d}(t) \end{aligned} \quad (3.26)$$

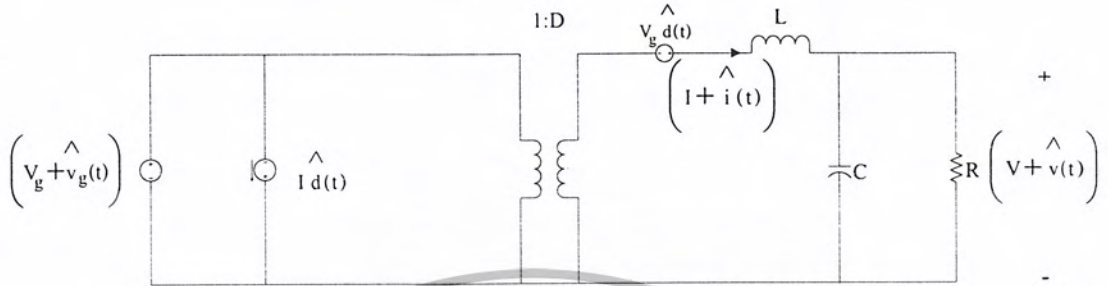
นำสมการที่ (3.25) และ (3.26) มาเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 วงจรสมมูลของสวิทช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.28 ของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซีแบบบัค

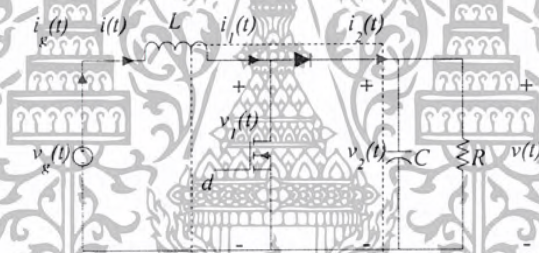
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.31 คือวงจรสมมูลของสวิตช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.28 ดังนั้นเขียนวงจรสมมูลของรูปที่ 3.28 ได้ดังรูปที่ 3.32



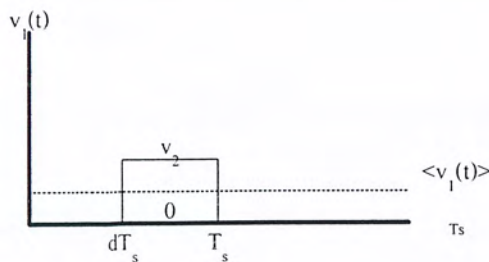
รูปที่ 3.32 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบบักในรูปหม้อแปลงอัตราส่วน 1:D

### 3.3.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิ - ดิจิ แบบบอสต์



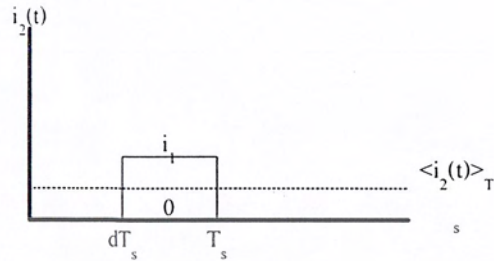
รูปที่ 3.33 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิ - ดิจิ แบบบอสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

จากรูปที่ 3.33 เมื่อมอสเฟตนำกระแส  $v_1$  และ  $i_1$  จะมีค่าเท่ากับ 0 และเมื่อมอสเฟตไม่นำกระแส  $v_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $v_2$ ,  $i_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $i_2$  นำความสัมพันธ์มาเขียนรูปสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.29 และ 3.30



รูปที่ 3.34 รูปสัญญาณของ  $v_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.35 รูปสัญญาณของ  $i_2$ 

จากรูปที่ 3.34 ค่าเฉลี่ยของ  $v_1$  มีค่า

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle v_2(t) \rangle_{T_s}$$

ทำการรวมกันสัญญาณ

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \\ \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D - d(t) \\ D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \\ \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \\ \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \end{bmatrix} &= D' \begin{bmatrix} \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \\ \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \end{bmatrix} - \hat{v}_2 d(t) - d(t) \hat{v}_2(t) \\ \begin{bmatrix} \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \\ \hat{v}_1 + \hat{v}_1(t) \end{bmatrix} &= D' \begin{bmatrix} \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \\ \hat{v}_2 + \hat{v}_2(t) \end{bmatrix} - \hat{v}_2 d(t) \end{aligned} \quad (3.27)$$

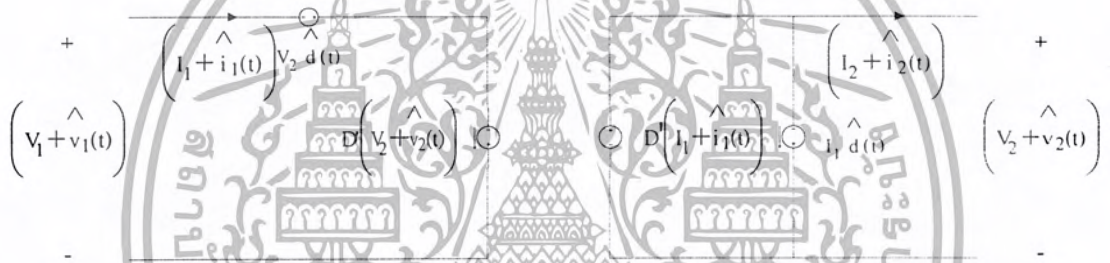
จากรูปที่ 3.35 ค่าเฉลี่ยของ  $i_2$  มีค่า

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle i_1(t) \rangle_{T_s}$$

ทำการรวมทวนสัญญาณ

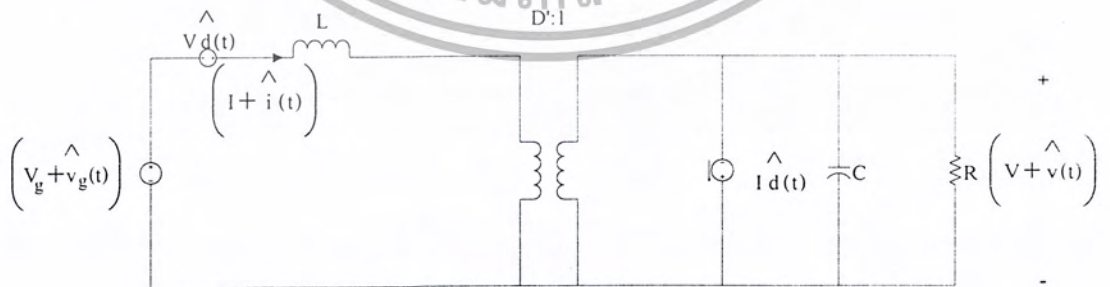
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_2 + \hat{i}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D' - \hat{d}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 + \hat{i}_1(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_2 + \hat{i}_2(t) \end{bmatrix} &= D' \begin{bmatrix} I_1 + \hat{i}_1(t) \end{bmatrix} - I_1 \hat{d}(t) - \hat{d}(t) \hat{i}_1(t) \\ \begin{bmatrix} I_2 + \hat{i}_2(t) \end{bmatrix} &= D' \begin{bmatrix} I_1 + \hat{i}_1(t) \end{bmatrix} - I_1 \hat{d}(t) \end{aligned} \tag{3.28}$$

นำสมการที่ (3.27) และ (3.28) มาเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 วงจรสมมูลของสวิตช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.33 ของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล-ดิซีสแบบบวสต์

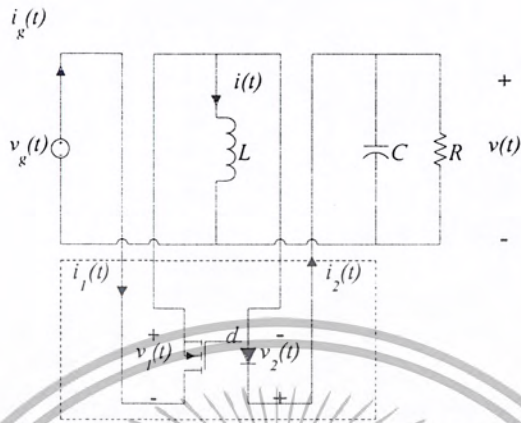
รูปที่ 3.36 คือวงจรสมมูลของสวิตช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.33 ดังนั้นเขียนวงจรสมมูลของรูปที่ 3.3 ได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล-ดิซีสแบบบวสต์ในรูปห่อแปลงอัตราส่วน D':1

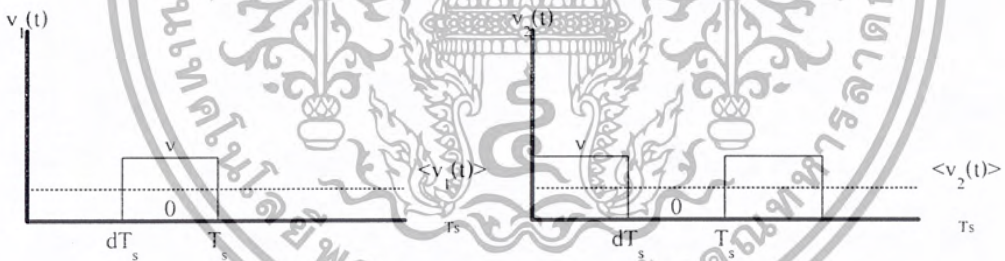
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 วงจรแปลงผันแรงดันคัตซี - คัตซีแบบบัก - บูสต์

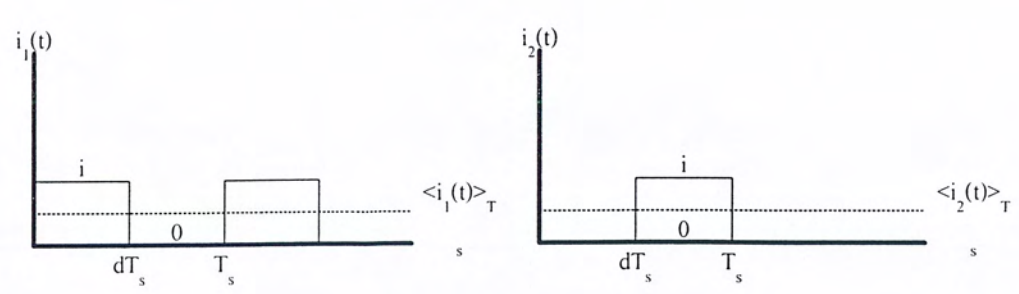


รูปที่ 3.38 วงจรแปลงผันแรงดันคัตซี - คัตซีแบบบัก - บูสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

จากรูปที่ 3.38 เมื่อมอสเฟตนำกระแส  $v_1 = 0, v_2 = v, i_1 = i, i_2 = 0$  และเมื่อมอสเฟตไม่นำกระแส  $v_1 = v, v_2 = 0, i_1 = 0, i_2 = i$  นำความสัมพันธ์มาเขียนรูปสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.39 และ 3.40



รูปที่ 3.39 รูปสัญญาณของ  $v_1, v_2$



รูปที่ 3.40 รูปสัญญาณของ  $i_1, i_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.39 ค่าเฉลี่ยของ  $v_1$  และ  $v_2$  มีค่า

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = d'(t) \langle v(t) \rangle_{T_s}$$

$$\langle v_2(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle v(t) \rangle_{T_s}$$

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{d'(t)}{d(t)} \langle v_2(t) \rangle_{T_s}$$

ทำการรบกวนสัญญาณ

$$\begin{aligned} \left[ D + \hat{d}(t) \right] \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] &= \left[ D' - \hat{d}(t) \right] \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] \\ \left[ D \right] \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] &= \left[ D' \right] \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] - \hat{d}(V_1 + V_2) \\ \left[ V_1 + \hat{v}_1(t) \right] &= \frac{D'}{D} \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] - \frac{\hat{d}}{D} (V_1 + V_2) \\ &= \frac{D'}{D} \left[ V_2 + \hat{v}_2(t) \right] - \hat{d} \left( \frac{V_1}{DD'} \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

จากรูปที่ 3.40 ค่าเฉลี่ยของ  $i_1$  และ  $i_2$  มีค่า

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = d(t) \langle i(t) \rangle_{T_s}$$

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = d'(t) \langle i(t) \rangle_{T_s}$$

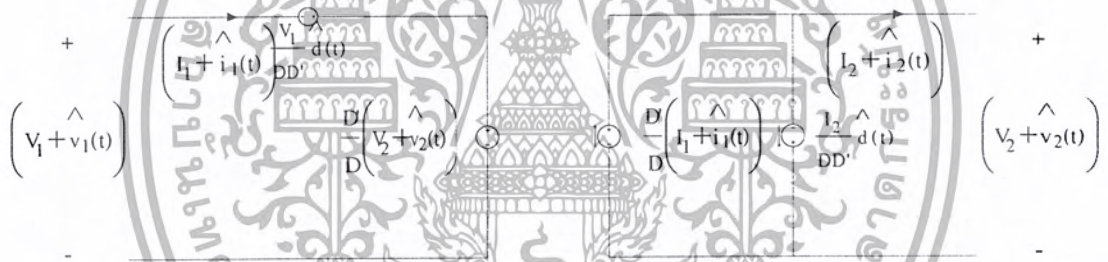
$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{d'(t)}{d(t)} \langle i_1(t) \rangle_{T_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการรวมทวนสัญญาณ

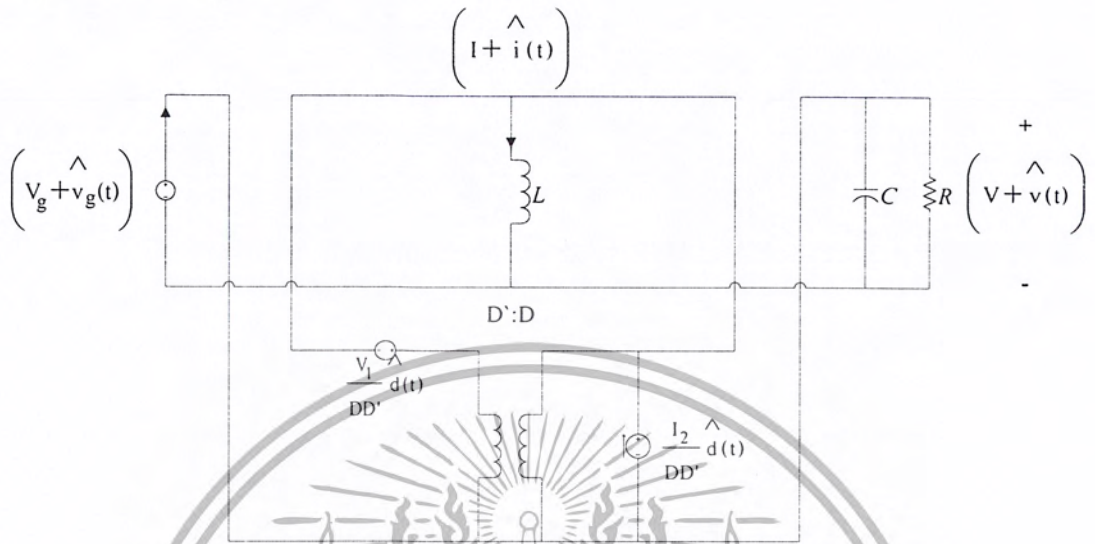
$$\begin{aligned}
 \left[ D + \hat{d}(t) \right] \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] &= \left[ D' - \hat{d}(t) \right] \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] \\
 D \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] &= D' \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] - \hat{d}(I_2 + I_1) \\
 \left[ I_2 + \hat{i}_2(t) \right] &= \frac{D'}{D} \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] - \frac{\hat{d}}{D} (I_2 + I_1) \\
 &= \frac{D'}{D} \left[ I_1 + \hat{i}_1(t) \right] - \hat{d} \left( \frac{I_2}{DD'} \right)
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

นำสมการที่ (3.29) และ (3.30) มาเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 วงจรสมมูลของสวิตช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.38 ของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิทัล-ดิซีสแบบบั๊ก - บุสต์

รูปที่ 3.41 คือวงจรสมมูลของสวิตช์ในกรอบเส้นประในรูปที่ 3.38 ดังนั้นเขียนวงจรสมมูลของรูปที่ 3.38 ได้ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันแรงดัน คิวซี-คิวซี แบบบัก-บูสต์ในรูปแบบอัตรส่วน  $D':D$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี

#### 4.1 บทนำ

ต่อเนื่องจากบทที่ผ่านมา เมื่อจำลองแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันได้แล้ว เราก็นำแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบวงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี โดยวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี ทำได้ 2 วิธีคือ

- 1) State - space
- 2) PWM

#### 4.2 วิธีหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธี State - space

##### 4.2.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบั๊ก

รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบั๊กในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด เมื่อมอสเฟตนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.2



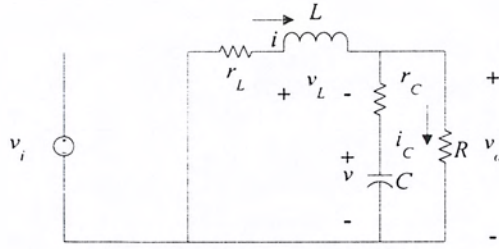
รูปที่ 4.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบั๊กเมื่อมอสเฟตนำกระแส

จากรูปที่ 4.2 ได้สมการ 3 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L &= L \frac{di}{dt} = v_i - ir_L - ir_C - v \\ i_C &= C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \\ v_o &= ir_C + v \end{aligned} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไดโอดนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรแปลงต้นแรงดัน คีซี - คีซี แบบบั๊กเมื่อไดโอดนำกระแส

จากรูปที่ 4.3 ได้สมการ 3 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L &= L \frac{di}{dt} = ir_L - ir_C - v \\ i_C &= C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \\ v_o &= ir_C + v \end{aligned} \quad (4.2)$$

กำหนดค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}_i &= [v_i] \end{aligned}$$

จากสมการที่ (4.1) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{v}_i$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_L + r_C)/L & -1/L \\ 1/C & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$

$$\mathbf{v}_o = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}$$

$$\mathbf{v}_o = \begin{bmatrix} r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.2) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_2 \mathbf{X} + \mathbf{B}_2 \mathbf{V}_i \\ \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_L + r_C)/L & -1/L \\ 1/C & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{V}_i \\ \mathbf{v}_o &= \mathbf{C}_2 \mathbf{X} \\ \mathbf{v}_o &= \begin{bmatrix} r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉลี่ยดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{D}\mathbf{A}_1 + \mathbf{D}'\mathbf{A}_2 \\ &= \begin{bmatrix} -D(r_L + r_C)/L & -D/L \\ D/C & -D/CR \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D'(r_L + r_C)/L & -D'/L \\ D'/C & -D'/CR \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -(r_L + r_C)/L & -1/L \\ 1/C & -1/CR \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \mathbf{D}\mathbf{B}_1 + \mathbf{D}'\mathbf{B}_2 \\ &= \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \mathbf{D}\mathbf{C}_1 + \mathbf{D}'\mathbf{C}_2 \\ &= \begin{bmatrix} r_C & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

นำค่าเมตริกซ์เฉลี่ยไปแทนค่าเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน

## 4.2.1.1 Steady – state dc transfer function

$$\frac{v_o}{v_i} = -CA^{-1}B$$

$$= -\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(r_L + r_c)/L & -1/L \\ 1/C & -1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} -(r_L + r_c)/L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1/CR \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1/L \end{pmatrix}} \begin{bmatrix} -1/CR & 1/L \\ -1/C & -(r_L + r_c)/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} (r_L + r_c)/LCR \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/CL \end{pmatrix}} \begin{bmatrix} -D/CR \\ -D/CL \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} Dr_c/CR \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} DR/CL \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (r_L + r_c)/LCR \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R/CL \end{pmatrix}}$$

$$= D \left( \frac{r_c + R}{r_L + r_c + R} \right)$$

$$\approx D$$



## 4.2.1.2 Small – signal line to output transfer function

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}$$

$$= \begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{(r_L + r_c)}{L} & 1/L \\ -1/C & s + 1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + 1/CR & -1/L \\ 1/C & s + \frac{(r_L + r_c)}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}}{(s + \frac{(r_L + r_c)}{L})(s + 1/CR) - (1/C)(-1/L)}$$

$$= \frac{\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (s + 1/CR)(D/L) \\ D/CL \end{bmatrix}}{(s^2 + (\frac{(r_L + r_c)}{L} + 1/CR)s + \frac{(r_L + r_c)}{LCR}) + (1/CL)}$$

$$= \frac{(r_c D/L)(s + 1/CR) + D/CL}{K}$$

$$= \frac{(r_c D/LC)(s + 1/CR) + D/CL}{K}$$

$$= D \left( \frac{r_c s C + \frac{r_c}{R} + 1}{LCK} \right)$$

$$= DH_e(s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.1.2 Small – signal line to output transfer function

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \\
 &= \begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{(r_L + r_c)}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{CR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{1}{CR} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & s + \frac{(r_L + r_c)}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}}{\left( s + \frac{(r_L + r_c)}{L} \right) \left( s + \frac{1}{CR} \right) + \left( \frac{1}{C} \right) \left( -\frac{1}{L} \right)} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (s + \frac{1}{CR}) \begin{pmatrix} D/L \end{pmatrix} \\ D/CL \end{bmatrix}}{\left( s^2 + \left( \frac{(r_L + r_c)}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \left( \frac{(r_L + r_c)}{LCR} \right) + \left( \frac{1}{CL} \right) \right)} \\
 &= \frac{\left( r_c \frac{D}{L} \right) \left( s + \frac{1}{CR} \right) + \frac{D}{CL}}{K} \\
 &= \frac{\left( r_c \frac{D}{LC} \right) \left( s + \frac{1}{CR} \right) + \frac{D}{CL}}{K} \\
 &= D \left( \frac{r_c s C + \frac{r_c}{R} + 1}{LCK} \right) \\
 &= DH_e(s)
 \end{aligned}$$

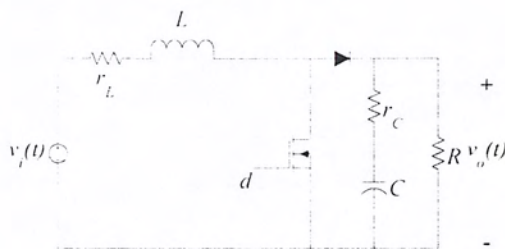
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.1.3 Duty cycle to output transfer function

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} &= C(sI - A)^{-1} [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i] + (C_1 - C_2)X \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} r_c & 1 \end{bmatrix}}{K} \begin{bmatrix} s + 1/CR & -1/L \\ 1/C & s + (r_L + r_c)/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 + V_o \begin{bmatrix} 1/DL \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} + 0 \\
 &= \frac{V_o}{K} \begin{bmatrix} r_c(s + 1/CR) + 1/C & -r_c/L \\ -1/L & s + (r_L + r_c)/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/DL \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{V_o}{K} \left[ \left( r_c(s + 1/CR) + 1/C \right) (1/DL) \right] \\
 &= \frac{V_o}{D} \left( \frac{r_c s C + r_c/R + 1}{LCK} \right) \\
 &= \frac{V_o}{D} H_e(s)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัสต์



รูปที่ 4.4 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เมื่อมอสเฟตนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.5

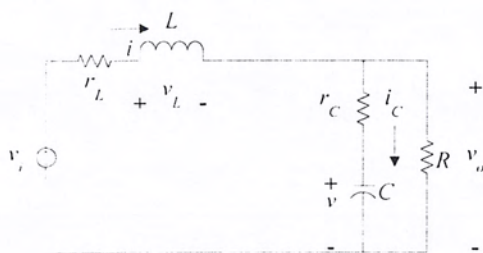


รูปที่ 4.5 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

จากรูปที่ 4.5 ได้สมการ (3) สมการคือ

$$\begin{aligned} v_L &= L \frac{di}{dt} = v_i - i r_L \\ i_C &= C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \end{aligned} \tag{4.5}$$

เมื่อไดโอดนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัสต์เมื่อไดโอดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ได้สมการ 3 สมการคือ

$$v_L = L \frac{di}{dt} = v_i - ir_L - ir_C - v$$

$$i_C = C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}$$

$$v_o = ir_C + v$$

(4.6)

กำหนดค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}$$

$$V_i = \begin{bmatrix} v_i \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4.5) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 V_i$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_L/L & 0 \\ 0 & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$

$$v_o = C_1 X$$

$$v_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}$$

(4.7)

จากสมการที่ (4.6) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\dot{X} = A_2 X + B_2 V_i$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_L + r_C)/L & -1/L \\ 1/C & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i$$

$$v_o = C_2 X$$

$$v_o = \begin{bmatrix} r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}$$

(4.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉลี่ยดังนี้

$$A = DA_1 + D'A_2$$

$$= \begin{bmatrix} -D r_L / L & 0 \\ 0 & -D / CR \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D'(r_L + r_C) / L & -D' / L \\ D' / C & -D' / CR \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -(r_L + D' r_C) / L & -D' / L \\ D' / C & -1 / CR \end{bmatrix}$$

$$B = DB_1 + D'B_2$$

$$= \begin{bmatrix} 1 / L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = DC_1 + D'C_2$$

$$= \begin{bmatrix} D' r_C & 1 \end{bmatrix}$$

นำค่าเมตริกซ์เฉลี่ยไปแทนค่าเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน

## 4.2.2.1 Steady – state dc transfer function

$$\frac{v_o}{v_i} = -CA^{-1}B$$

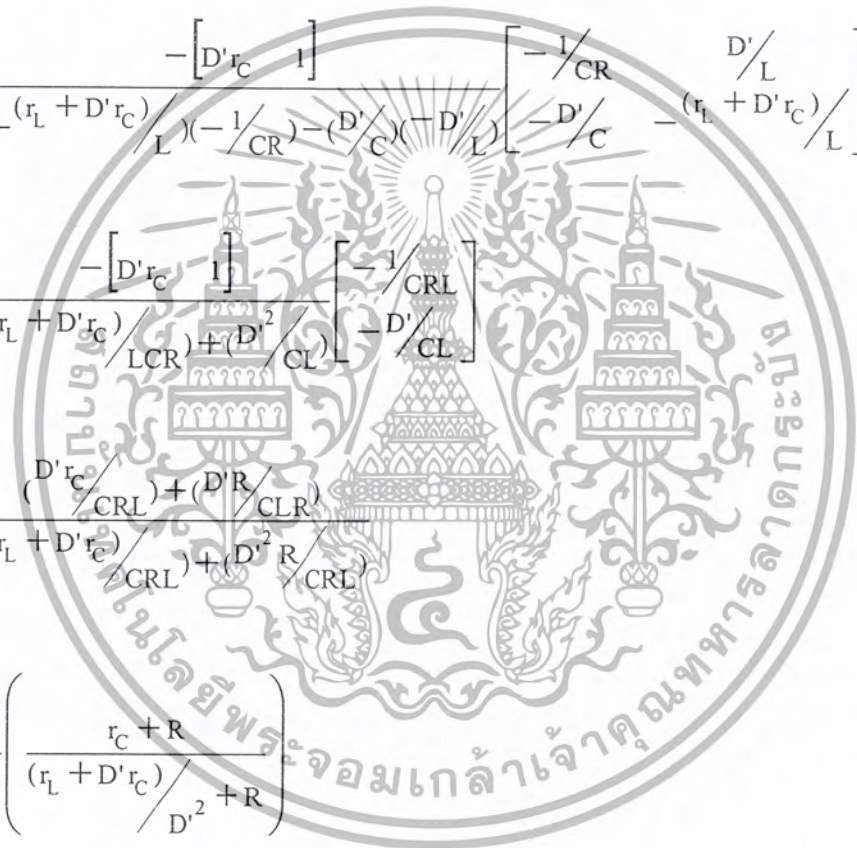
$$= -\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(r_L + D'r_c)/L & -D'/L \\ D'/C & -1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} -(r_L + D'r_c)/L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1/CR \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} D'/C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -D'/L \end{pmatrix}} \begin{bmatrix} -1/CR & D'/L \\ -D'/C & -(r_L + D'r_c)/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} (r_L + D'r_c)/LCR \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D'^2/CL \end{pmatrix}} \begin{bmatrix} -1/CRL \\ -D'/CL \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} D'r_c/CRL \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D'R/CLR \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (r_L + D'r_c)/CRL \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D'^2R/CRL \end{pmatrix}}$$

$$= \frac{1}{D'} \left( \frac{r_c + R}{(r_L + D'r_c)/D'^2 + R} \right)$$



## 4.2.2.2 Small – signal line to output transfer function

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= C(sI - A)^{-1} B \\
 &= \begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{(r_L + D'r_c)}{L} & D'/L \\ -D'/C & s + 1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix}}{(s + \frac{(r_L + D'r_c)}{L})(s + 1/CR) - (-D'/C)(D'/L)} \begin{bmatrix} s + 1/CR & -D'/L \\ D'/C & s + \frac{(r_L + D'r_c)}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \end{bmatrix}}{(s^2 + (\frac{(r_L + D'r_c)}{L} + 1/CR)s + \frac{(r_L + D'r_c)}{LCR}) + (D'^2/CL)} \begin{bmatrix} (s + 1/CR)(1/L) \\ D'/CL \end{bmatrix} \\
 &= \frac{(D'r_c/L)(s + 1/CR) - D'/CL}{K} \\
 &= \frac{K}{(D'r_c/CL)(sC + 1/R) - D'/CL} \\
 &= \frac{D'}{CL} \left( \frac{r_c sC + r_c/R + 1}{K} \right); L = L_e D'^2 \\
 &= \frac{1}{D'} \left( \frac{r_c sC + r_c/R + 1}{CL_e K} \right) \\
 &= \frac{1}{D'} H_e(s)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2.3 Duty cycle to output transfer function

$$X = -A^{-1}BV_i$$

$$= \frac{-V_i}{\left(\frac{r_l + D'r_c}{LCR}\right) + (D'^2/CL)} \begin{bmatrix} -1/CLR \\ -D'/CL \end{bmatrix} = \frac{V_i}{D'^2} \begin{bmatrix} 1/R \\ D' \end{bmatrix}$$

$$= V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} = C(sI - A)^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i] + (C_1 - C_2)X$$

$$= \begin{bmatrix} D'r_c & 1 \\ 1 & s + \frac{r_l + D'r_c}{L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r_c}{L} & 1/L \\ -D'/C & s + 1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{r_c}{L} & 1/L \\ -1/C & 0 \end{bmatrix} V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ 1 \end{bmatrix} + 0$$

$$+ \begin{bmatrix} -r_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\begin{bmatrix} D'r_c & 1 \\ 1 & s + \frac{r_l + D'r_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + 1/CR & D'/L \\ D'/C & s + \frac{r_l + D'r_c}{L} \end{bmatrix}}{\left(s + \frac{r_l + D'r_c}{L}\right)\left(s + 1/CR\right) - \left(-D'/C\right)\left(D'/L\right)} \begin{bmatrix} \frac{r_c}{L} & 1/L \\ -1/C & 0 \end{bmatrix} V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$V_o \begin{bmatrix} \frac{r_c}{LD'R} + 1/L \\ -1/CD'R \end{bmatrix} - V_o \begin{bmatrix} \frac{r_c}{LD'R} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{V_o}{K} \begin{bmatrix} (D'r_c)\left(s + 1/CR\right) + D'/C & -D'r_c/L + s + \frac{r_l + D'r_c}{L} \\ \frac{r_c}{LD'R} + 1/L \\ -1/CD'R \end{bmatrix}$$

$$= \frac{V_o}{K} \begin{bmatrix} \left((D'r_c)\left(s + 1/CR\right) + D'/C\right)\left(\frac{r_c}{LD'R} + 1/L\right) + \\ \left(-D'r_c/L + s + \frac{r_l + D'r_c}{L}\right)\left(-1/CD'R\right) \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{V_o}{K} \left[ \frac{D'}{LC} \right] \left[ \left( r_c s + \frac{r_c}{R} + 1 \right) \left( \frac{r_c}{D'R} + 1 \right) + \left( \frac{r_c}{R} - \frac{sL}{D'^2 R} - \frac{r_l}{D'^2 R} - \frac{r_c}{D'R} \right) \right]$$

;  $L = L_c D'^2$

$$= \frac{V_o}{K} \left[ \frac{1}{D'CL_c} \right] \left[ \left( r_c s + \frac{r_c}{R} + 1 \right) + \left( \frac{r_c}{R} - \frac{sL_c}{R} - \frac{r_l}{D'^2 R} - \frac{r_c}{D'R} \right) \right]$$

$$= \frac{V_o}{D'} \left[ \frac{1}{KCL_c} \right] \left[ \left( r_c s + \frac{r_c}{R} + 1 \right) + \left( \frac{r_c}{R} - \frac{sL_c}{R} - \frac{r_l}{D'^2 R} - \frac{r_c}{D'R} \right) \right]$$

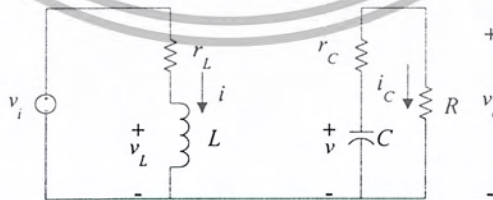
$$\approx \frac{V_o}{D'} \left[ 1 - \frac{sL_c}{R} \right] H_c(s)$$

4.2.3 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์



รูปที่ 4.7 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์ในรูปแบบมอสเฟตและไดโอด

เมื่อมอสเฟตนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี-ดิซี แบบบัค-บูสต์เมื่อมอสเฟตนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ได้สมการ 3 สมการคือ

$$\begin{aligned} v_i &= L \frac{di}{dt} = v_i - ir_i \\ i_c &= C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \\ v_o &= v \end{aligned} \quad (4.9)$$

เมื่อไดโอดนำกระแสได้วงจรดังรูปที่ 4.9



กำหนดค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \\ v_i &= \begin{bmatrix} v_i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.9) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_1 \mathbf{X} + \mathbf{B}_1 V_i \\ \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1/L & 0 \\ 0 & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i \\ v_o &= \mathbf{C}_1 \mathbf{X} \\ v_o &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.10) เขียนให้อยู่ในรูป State equation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_1 \mathbf{X} + \mathbf{B}_1 V_i \\ \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} di/dt \\ dv/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1/L & 0 \\ 0 & -1/CR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} v_i \\ v_o &= \mathbf{C}_1 \mathbf{X} \\ v_o &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) จะได้ค่าเมตริกซ์เฉลี่ยดังนี้

$$\begin{aligned} A &= DA_1 + D'A_2 \\ &= \begin{bmatrix} -D'r_L/L & 0 \\ 0 & -D/CR \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D'r_L/L & D'/L \\ -D'/C & -D'/CR \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -r_L/L & D'/L \\ -D'/C & -1/CR \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$B = DB_1 + D'B_2$$

$$= \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = DC_1 + D'C_2$$

$$= \begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \end{bmatrix}$$

นำค่าเมตริกซ์เฉลี่ยไปแทนค่าเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน



## 4.2.3.1 Steady – state dc transfer function

$$\frac{v_o}{v_i} = -CA^{-1}B$$

$$v_i$$

$$= -\begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_L/L & D'/L \\ -D'/C & -1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \end{bmatrix}}{(-r_L/L)(-1/CR) - (-D'/C)(D'/L)} \begin{bmatrix} -1/CR & -D'/L \\ D'/C & -r_L/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'/L \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\begin{bmatrix} D'r_c & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -D'/CRL \\ D'D/CL \end{bmatrix}}{(r_L/LCR) + (D'^2/CL)} \begin{bmatrix} -D'/CRL \\ D'D/CL \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-(D'r_c D'/CRL) - (D'DR/CRL)}{(r_L/CRL) + (D'^2 R/CRL)}$$

$$= \frac{D}{D'} \left( \frac{-r_c - R}{r_L/D'^2 + R} \right)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.3.2 Small – signal line to output transfer function

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= \mathbf{C}(\mathbf{sI} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \\
 &= \begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \\ s + r_L/L & -D'/L \\ D'/C & s + 1/CR \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'/L \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \\ s + 1/CR & D'/L \end{bmatrix}}{(s + r_L/L)(s + 1/CR) - (D'/C)(-D'/L)} \begin{bmatrix} s + 1/CR & D'/L \\ -D'/C & s + r_L/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'/L \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \\ s + 1/CR & D'/L \end{bmatrix}}{(s^2 + (r_L/L + 1/CR)s + 1/LCR) + (D'^2/CL)} \begin{bmatrix} (s + 1/CR)(D'/L) \\ -D'D/CL \end{bmatrix} \\
 &= \frac{-D'r_c D'/L (s + 1/CR) - D'D/CL}{K} \\
 &= \frac{-D'r_c D'/CL (sC + 1/R) - D'D/CL}{K} \\
 &= \frac{D'D}{CL} \left( \frac{-(r_c sC + r_c/R + 1)}{K} \right); L = L_e D'^2 \\
 &= \frac{D}{D'} \left( \frac{-(r_c sC + r_c/R + 1)}{CL_e K} \right) \\
 &= -\frac{D}{D'} H_e(s)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.3.3 Duty cycle to output transfer function

$$\begin{aligned}
 X &= -A^{-1}BV_i \\
 &= \frac{-V_i}{(r_c/L + D^2/CL)} \begin{bmatrix} -D/CR \\ D'D/CL \end{bmatrix} = \frac{DV_i}{D^2} \begin{bmatrix} 1/R \\ -D' \end{bmatrix} \\
 &= V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ -1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} &= C(sI - A)^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i] + (C_1 - C_2)X \\
 &= \begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + r_c/L & -D'/L \\ D'/C & s + 1/CR \end{bmatrix}^{-1} \left[ \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix} V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ -1 \end{bmatrix} + V_o \begin{bmatrix} D'/DL \\ 0 \end{bmatrix} \right] \\
 &\quad + \begin{bmatrix} r_c & 0 \end{bmatrix} V_o \begin{bmatrix} 1/D'R \\ -1 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\begin{bmatrix} -D'r_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + 1/CR & D'/L \\ -D'/C & s + r_c/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/LD \\ 1/CRD' \end{bmatrix} V_o}{(s + r_c/L)(s + 1/CR) - (D'/C)(-D'/L)} \begin{bmatrix} 1/LD \\ 1/CRD' \end{bmatrix} \\
 &\quad + V_o \begin{bmatrix} r_c/D'R \\ -1 \end{bmatrix} \\
 &= \frac{V_o}{K} \begin{bmatrix} (-D'r_c)(s + 1/CR) - D^2/C & -D^2r_c/L + s + r_c/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/LD \\ 1/CRD' \end{bmatrix} \\
 &= \frac{V_o}{K} \left[ \left( (-D'r_c)(s + 1/CR) - D^2/C \right) \left( 1/LD \right) + \left( -D^2r_c/L + s + r_c/L \right) \left( 1/CRD' \right) \right] \\
 &= \frac{V_o}{K} \left[ \frac{D'}{DLC} \right] \left[ - \left( r_c s + r_c/R + 1 \right) + \left( -r_c^D/R + sL^D/D^2R + r_c^D/D^2R \right) \right]; L = L_c D^2 \\
 &= \frac{V_o}{K} \left[ \frac{1}{DD'CL_c} \right] \left[ - \left( r_c s + r_c/R + 1 \right) + \left( -r_c^D/R + sL_c^D/D^2R + r_c^D/D^2R \right) \right] \\
 &= \frac{V_o}{DD'} \left[ \frac{1}{KCL_c} \right] \left[ - \left( r_c s + r_c/R + 1 \right) + \left( -r_c^D/R + sL_c^D/D^2R + r_c^D/D^2R \right) \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\approx \frac{V_c}{DD'} \left[ -1 + sL_c D / R \right] H_c(s)$$

$$\approx -\frac{V_c}{DD'} \left[ 1 - sL_c D / R \right] H_c(s)$$

### 4.3 วิธีหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธี Pulse width modulation

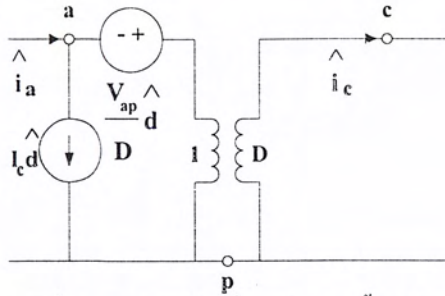
#### 4.3.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัก

เขียนแทนวงจร PWM สวิตช์ด้วยวงจрдังรูปที่ 4.10



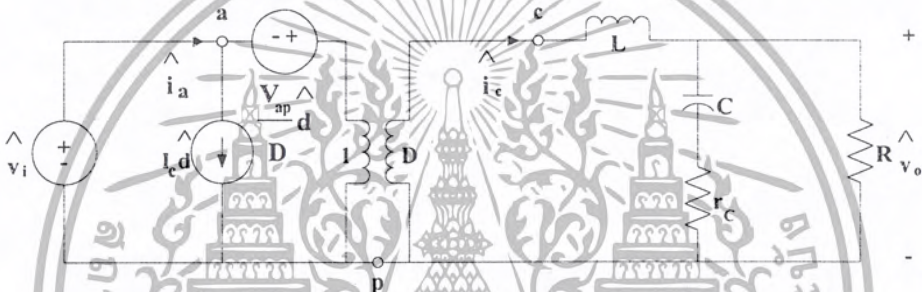
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 PWM สวิตช์ในรูปแบบหม้อแปลง

นำรูปที่ 4.11 ไปเขียนแทนใน PWM สวิตช์ในรูปที่ 3.28 ได้

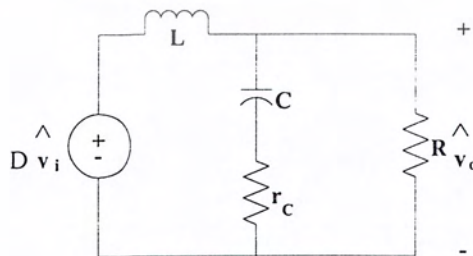


รูปที่ 4.13 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจิตอล - ดิจิตอล แทน PWM สวิตช์ในรูปแบบหม้อแปลง

4.3.1.1 Open - loop line to output transfer function

$$G_{vv}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i}$$

ให้  $d=0, i_o=0$  ได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14

วงจรสมมูลระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์วงจรรูปที่ 4.14

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = \frac{D(R//Z_C)}{Z_L + (R//Z_C)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{D \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)}{Z_L + \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)} = \frac{D \left( \frac{R(1/sC + r_c)}{R + 1/sC + r_c} \right)}{Z_L + \left( \frac{R(1/sC + r_c)}{R + 1/sC + r_c} \right)} \\
 &= \frac{DR(1/sC + r_c)}{sL(R + 1/sC + r_c) + R(1/sC + r_c)} = \frac{DR(1 + r_c sC)}{sL(RsC + 1 + r_c sC) + R(1 + r_c sC)} \\
 &= \frac{DR}{R} \times \frac{(1 + r_c sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_c Cs}{R} \right) + \left( 1 + \frac{r_c CRs}{R} \right)} \\
 &= D \times \frac{(1 + r_c sC)}{1 + \left( \frac{L + r_c CR}{R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_c C}{R} \right) s^2}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = M \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z_c}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} = D \times \frac{(1 + r_c s C)}{1 + \left(\frac{L + r_c C R}{R}\right)s + \left(\frac{LRC + Lr_c C}{R}\right)s^2}$$

$$M = D$$

$$\omega_{z_c} = \frac{1}{r_c C}$$

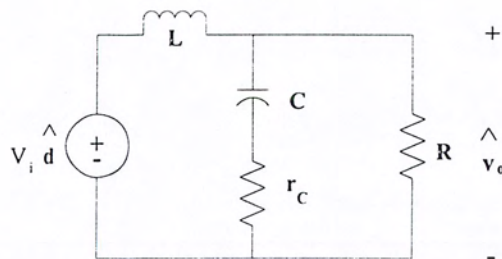
$$Q = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{R}{L + r_c C R} = \frac{1}{\omega_0} \times \left( \frac{1}{\frac{L}{R} + r_c C} \right)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R}{LRC + Lr_c C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{R}{R + r_c C}}$$

#### 4.3.1.2 Control to output transfer function

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o}{d}$$

ให้  $\hat{v}_i = 0, \hat{i}_o = 0$  ได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับดิวตีไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์วงจรรูปที่ 4.15

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} &= \frac{V_i(R//Z_C)}{Z_L + (R//Z_C)} \\
 &= \frac{V_i \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)}{Z_L + \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)} = \frac{V_i \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)}{sL + \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)} \\
 &= \frac{V_i R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{sL \left( R + \frac{1}{sC} + r_C \right) + R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)} = \frac{V_i R (1 + r_C sC)}{sL (R sC + 1 + r_C sC) + R (1 + r_C sC)} \\
 &= \frac{V_i R}{R} \times \frac{(1 + r_C sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_C Cs^2}{R} \right) + \left( 1 + \frac{r_C CRs}{R} \right)} \\
 &= V_i \times \frac{(1 + r_C sC)}{1 + \left( \frac{L + r_C CR}{R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_C C}{R} \right) s^2}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = K_d \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z_c}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} = V_i \times \frac{(1 + r_c s C)}{1 + \left(\frac{L + r_c C R}{R}\right) s + \left(\frac{LRC + Lr_c C}{R}\right) s^2}$$

$$K_d = V_i$$

$$\omega_{z_c} = \frac{1}{r_c C}$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{R}{L + r_c C R} = \frac{1}{\omega_0} \times \left( \frac{1}{\frac{L}{R} + r_c C} \right)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R}{LRC + Lr_c C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{R}{R + r_c C}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$V_{ap} = -V_o$$

$$V_{cp} = DV_{ap} = -DV_o$$

$$0 = V_i - V_{cp} - V_o$$

$$V_i = -DV_o + V_o = D'V_o$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{D'}$$

$$I_a = DI_c$$

$$0 = I_a - I_c + I_o = DI_c - I_c + I_o$$

$$I_c = \frac{I_o}{1-D} = \frac{I_o}{D'}$$

$$= \left(\frac{1}{D'}\right) \left(\frac{V_o}{R}\right) = -\left(\frac{1}{D'}\right) \left(\frac{DV_i}{RD'}\right) = -\frac{DV_i}{D'^2 R}$$

4.3.2.1 Open - loop line to output transfer function

$$G_{vv}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i}$$

ให้  $\hat{d}=0, \hat{i}_o=0$  ได้วงจรมุมดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 วงจรมุมเมื่อแทนด้วยสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์วงจรรูปที่ 4.18

$$i_a = Di_c$$

$$0 = i_a - i_c - i_o$$

$$0 = Di_c - i_c - i_o$$

$$i_c = -\frac{i_o}{1-D} = -\frac{i_o}{D'}$$

$$v_L = i_L Z_L; i_L = -i_c$$

$$= \frac{i_c Z_L}{D}$$

$$= \frac{v_o Z_L}{D'(R//Z_C)} \quad Z_L = \frac{v_o X + Z_L}{D' R//Z_C}$$

$$v_{ap} = -v_o$$

$$v_{cp} = Dv_{ap} = -Dv_o$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = -\hat{v}_i + \hat{v}_L + \hat{v}_{cp} + \hat{v}_o$$

$$0 = -\hat{v}_i + \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} - D\hat{v}_o + \hat{v}_o = -\hat{v}_i + \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + (1-D)\hat{v}_o$$

$$0 = -\hat{v}_i + \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D'\hat{v}_o$$

$$\hat{v}_i = \left( \frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D' \right) \hat{v}_o$$

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = \frac{D'(R // Z_C)}{Z_L + D'^2 (R // Z_C)}$$

$$= \frac{D' \left( \frac{RZ_C}{R + Z_C} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{RZ_C}{R + Z_C} \right)}$$

$$= \frac{D' \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)}$$

$$= \frac{D'R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{sL \left( R + \frac{1}{sC} + r_C \right) + D'^2 R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}$$

$$= \frac{D'R(1 + r_C sC)}{sL(RsC + 1 + r_C sC) + D'^2 R(1 + r_C sC)}$$

$$= \frac{D'R}{D'^2 R} \times \frac{(1 + r_C sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_C Cs^2}{D'^2 R} \right) + \left( 1 + \frac{r_C CD'^2 Rs}{D'^2 R} \right)}$$

$$= \frac{1}{D'} \times \frac{(1 + r_C sC)}{1 + \left( \frac{L + r_C CD'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_C C}{D'^2 R} \right) s^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = M \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z_c}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} = \frac{1}{D'} \times \frac{(1 + r_c C s)}{1 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_c C}{D'^2 R} \right) s^2}$$

$$M = \frac{1}{D'}$$

$$\omega_{z_c} = \frac{1}{r_c C}$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{D'^2 R}{L + r_c C D'^2 R} = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{1}{\left( \frac{L}{D'^2 R} + r_c C \right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D'^2 R}{LRC + Lr_c C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{D'^2 R}{R + r_c C}}$$

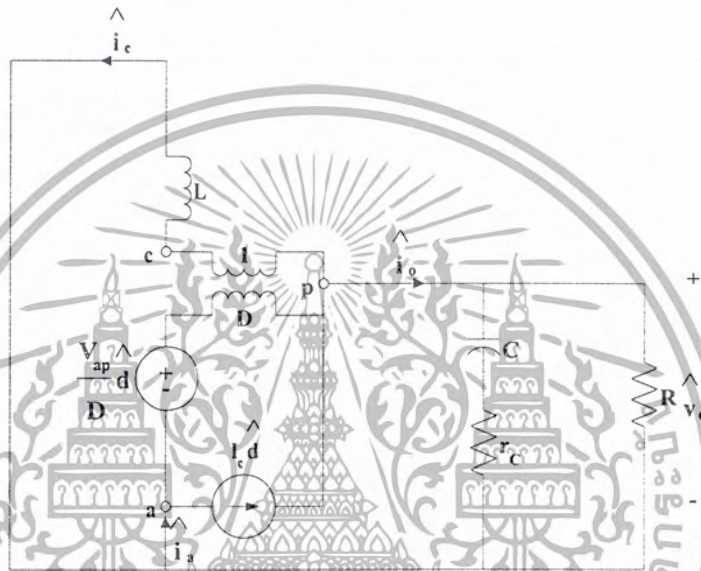


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3.2.2 Control to output transfer function

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$$

ให้  $\hat{v}_i = 0, \hat{i}_o = 0$  ได้วงจรมุมดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 วงจรมุมเมื่อแทนด้วยสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์วงจรรูปที่ 4.19

$$\hat{i}_a = D\hat{i}_c + I_c \hat{d}$$

$$0 = \hat{i}_a - \hat{i}_c - \hat{i}_o$$

$$0 = D\hat{i}_c + I_c \hat{d} - \hat{i}_c - \hat{i}_o$$

$$\hat{i}_c = \frac{I_c \hat{d} - \hat{i}_o}{1 - D} = \frac{I_c \hat{d} - \hat{i}_o}{D'}$$

$$\hat{v}_L = \hat{i}_L Z_L ; \hat{i}_L = -\hat{i}_c$$

$$= \frac{-I_c \hat{d} + \hat{i}_o}{D'} Z_L$$

$$= \frac{-I_c \hat{d} + \frac{v_o}{R // Z_C}}{D'} Z_L = \frac{-I_c \hat{d} (R // Z_C) + v_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C}$$

$$v_{ap} = -v_o$$

$$v_{cp} = Dv_{ap} + V_{ap} \hat{d} = -Dv_o - v_o \hat{d}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = \hat{v}_L + \hat{v}_{cp} + \hat{v}_o$$

$$0 = \frac{-I_c d(R//Z_C) + \hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} - D\hat{v}_o - V_o d + \hat{v}_o$$

$$0 = -\frac{I_c d}{D'} Z_L + \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} + (1-D)\hat{v}_o - V_o d$$

$$0 = \left( -\frac{I_c Z_L}{D'} - V_o \right) d + \left( \frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} + D' \right) \hat{v}_o$$

$$\begin{aligned} \frac{\hat{v}_o}{d} &= \frac{\frac{I_c Z_L}{D'} + V_o}{\frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} + D'} = \frac{(I_c Z_L + V_o D')(R//Z_C)}{Z_L + D'^2 (R//Z_C)} \\ &= \frac{\left( -\frac{V_i}{D'^2 R} \times Z_L + V_i \right) (R//Z_C)}{Z_L + D'^2 (R//Z_C)} = \frac{V_i \left( 1 - \frac{Z_L}{D'^2 R} \right) (R//Z_C)}{Z_L + D'^2 (R//Z_C)} \\ &= \frac{V_i \left( 1 - \frac{Z_L}{D'^2 R} \right) \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)} = \frac{V_i \left( 1 - \frac{sL}{D'^2 R} \right) \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)}{sL + D'^2 \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)} \\ &= \frac{V_i R \left( 1 - \frac{sL}{D'^2 R} \right) \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{sL \left( R + \frac{1}{sC} + r_C \right) + D'^2 R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)} = \frac{V_i R \left( 1 - \frac{sL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{sL (R sC + 1 + r_C sC) + D'^2 R (1 + r_C sC)} \\ &= \frac{V_i R}{D'^2 R} \times \frac{\left( 1 - \frac{sL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_C Cs^2}{D'^2 R} \right) + \left( 1 + \frac{r_C CD'^2 Rs}{D'^2 R} \right)} \\ &= \frac{V_i}{D'^2} \times \frac{\left( 1 - \frac{sL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{1 + \left( \frac{L + r_C CD'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_C C}{D'^2 R} \right) s^2} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = K_d \times \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{ZC}}\right) \left(1 - \frac{s}{\omega_{ZRHP}}\right)}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s}{\omega_0^2}}$$

$$= \frac{V_i}{2} \times \frac{\left(1 - \frac{sL}{2}\right) (1 + r_c s C)}{\frac{D' R}{2} \left(1 + \frac{L + r_c C D' R}{2} s + \frac{L R C + L r_c C}{2} s^2\right) \frac{D' R}{2}}$$

$$K_d = \frac{V_i}{2} \frac{D'}{D' R}$$

$$\omega_{ZC} = \frac{1}{r_c C}$$

$$\omega_{ZRHP} = \frac{D' R}{L}$$

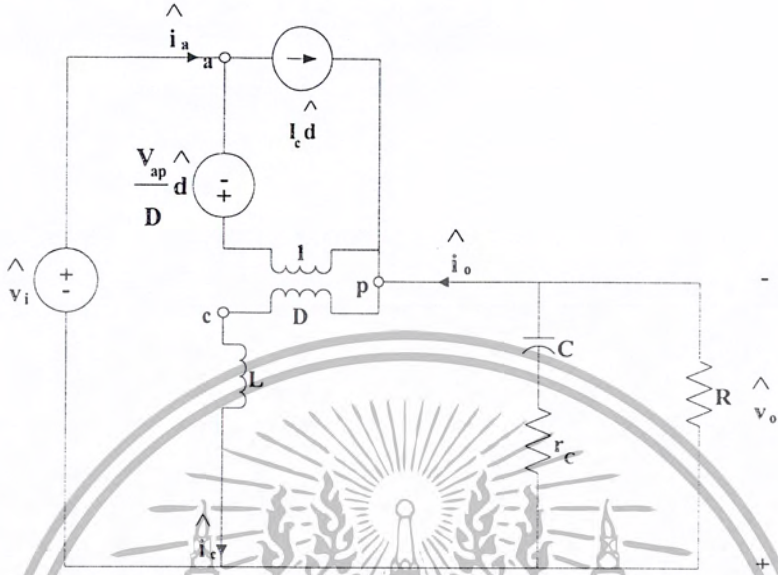
$$Q = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{D' R}{L + r_c C D' R} = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{1}{\frac{L}{2} + r_c C} \frac{D' R}{D' R}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D' R}{L R C + L r_c C}} = \frac{1}{\sqrt{L C}} \times \sqrt{\frac{D' R}{R + r_c}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

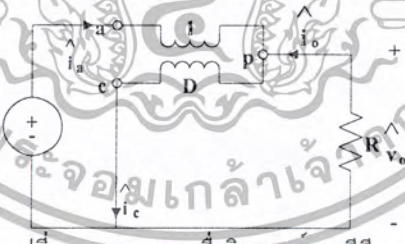
## 4.3.3 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค – บูสต์

นำรูปที่ 4.11 ไปเขียนแทนใน PWM สวิตช์ในรูปที่ 3.38 ได้



รูปที่ 4.20 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัค - บูสต์เมื่อแทน PWM สวิตช์ในรูปแบบหม้อแปลง

วิเคราะห์แบบดีซี ได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 วงจรสมมูลเมื่อวิเคราะห์แบบดีซี

$$V_{cp} = V_o$$

$$V_{ap} = \frac{V_{cp}}{D} = \frac{V_o}{D}$$

$$0 = V_i - V_{ap} + V_o$$

$$V_i = \frac{V_o}{D} - V_o = \frac{D'}{D} V_o$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{D'}$$

$$I_a = DI_c$$

$$0 = I_a - I_c + I_o = DI_c - I_c + I_o$$

$$I_c = \frac{I_o}{1-D} = \frac{I_o}{D'}$$

$$= \left( \frac{1}{D'} \right) \left( \frac{V_o}{R} \right) = - \left( \frac{1}{D'} \right) \left( \frac{DV_i}{RD'} \right) = - \frac{DV_i}{2}$$

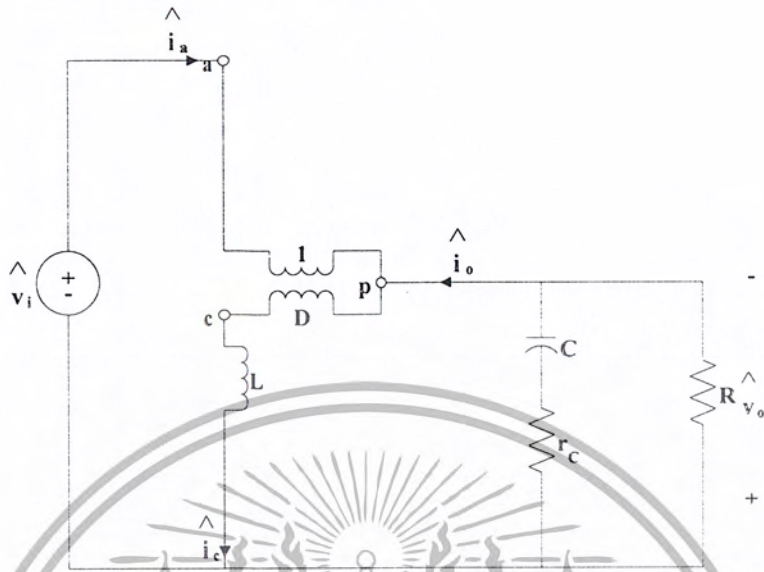
D' R

#### 4.3.3.1 Open - loop line to output transfer function

$$G_{vv}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้  $\hat{d} = 0, \hat{i}_o = 0$  ได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 วงจรสมมูลใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอินพุต  
วิเคราะห์ห้วงจรรูปที่ 4.22

$$\hat{i}_a = D\hat{i}_c$$

$$0 = \hat{i}_a - \hat{i}_c + \hat{i}_o$$

$$0 = D\hat{i}_c - \hat{i}_c + \hat{i}_o$$

$$\hat{i}_c = \frac{\hat{i}_o}{1-D} = \frac{\hat{i}_o}{D'}$$

$$\hat{v}_L = \hat{i}_L Z_L \quad \hat{i}_L = \hat{i}_c$$

$$= \frac{\hat{i}_o}{D'} Z_L$$

$$= \frac{\hat{v}_o}{D'(R // Z_C)} Z_L = \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C}$$

$$\hat{v}_{ap} = \hat{v}_i + \hat{v}_o$$

$$\hat{v}_{cp} = D \hat{v}_{ap} = D(\hat{v}_i + \hat{v}_o)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = -\hat{v}_L + \hat{v}_{cp} - \hat{v}_o$$

$$0 = -\frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D(\hat{v}_i + \hat{v}_o) - \hat{v}_o$$

$$0 = -\frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D\hat{v}_i - (1-D)\hat{v}_o = -\frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D\hat{v}_i - D'\hat{v}_o$$

$$D\hat{v}_i = \left( \frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C} + D' \right) \hat{v}_o$$

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = \frac{DD'(R // Z_C)}{Z_L + D'^2(R // Z_C)}$$

$$= \frac{DD' \left( \frac{RZ_C}{R + Z_C} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{RZ_C}{R + Z_C} \right)}$$

$$= \frac{DD' \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_c \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_c} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_c \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_c} \right)}$$

$$= \frac{DD'R \left( \frac{1}{sC} + r_c \right)}{sL \left( R + \frac{1}{sC} + r_c \right) + D'^2 R \left( \frac{1}{sC} + r_c \right)}$$

$$= \frac{DD'R(1 + r_c sC)}{sL(RsC + 1 + r_c sC) + D'^2 R(1 + r_c sC)}$$

$$= \frac{DD'R}{D'^2 R} \times \frac{(1 + r_c sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_c Cs^2}{D'^2 R} \right) + \left( 1 + \frac{r_c CD'^2 Rs}{D'^2 R} \right)}$$

$$= \frac{D}{D'} \times \frac{(1 + r_c sC)}{1 + \left( \frac{L + r_c CD'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_c C}{D'^2 R} \right) s^2}$$

$$= \frac{D}{D'} \times \frac{(1 + r_c sC)}{1 + \left( \frac{L + r_c CD'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_c C}{D'^2 R} \right) s^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_i} = M \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z_c}}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} = \frac{D}{D'} \times \frac{(1 + r_c C s)}{1 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_c C}{D'^2 R} \right) s^2}$$

$$M = \frac{D}{D'}$$

$$\omega_{z_c} = \frac{1}{r_c C}$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{D'^2 R}{L + r_c C D'^2 R} = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{1}{\left( \frac{L}{D'^2 R} + r_c C \right)}$$

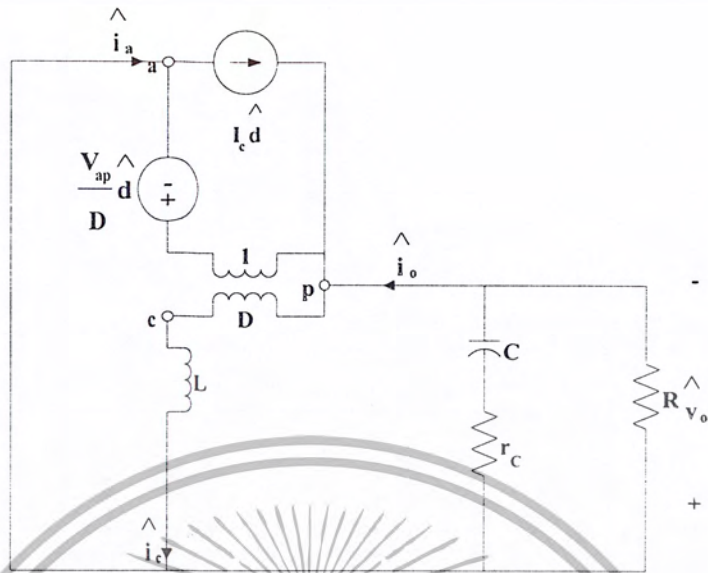
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D'^2 R}{LRC + Lr_c C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{D'^2 R}{R + r_c C}}$$

#### 4.3.3.2 Control to output transfer function

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}$$

ให้  $\hat{v}_i = 0, \hat{i}_o = 0$  ได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับดีวีดีไซเคิล

วิเคราะห์วงจรรูปที่ 4.23

$$i_a = D i_o + I_c d$$

$$0 = i_a - i_c + i_o$$

$$0 = D i_c + I_c d - i_c + i_o$$

$$i_c = \frac{I_c d + i_o}{1 - D} = \frac{I_c d + i_o}{D'}$$

$$v_L = i_L Z_L \quad ; \quad i_L = i_c$$

$$= \frac{I_c d + i_o}{D'} Z_L$$

$$= \frac{I_c d + \frac{v_o}{R // Z_C}}{D'} Z_L = \frac{I_c d (R // Z_C) + v_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R // Z_C}$$

$$\hat{v}_{ap} = \hat{v}_o$$

$$\hat{v}_{cp} = D \hat{v}_{ap} + V_{ap} d = D \hat{v}_o + (V_i + V_o) d$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
0 &= -\hat{v}_L + \hat{v}_{cp} - \hat{v}_o \\
0 &= \frac{-I_c d(R//Z_C) - \hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} + D\hat{v}_o + (V_i + V_o)d - \hat{v}_o \\
0 &= -\frac{I_c d}{D'} Z_L - \frac{\hat{v}_o}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} - (1-D)\hat{v}_o + (V_i + V_o)d \\
0 &= \left( -\frac{I_c Z_L}{D'} + V_i + V_o \right) d + \left( -\frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} - D' \right) \hat{v}_o \\
\frac{\hat{v}_o}{d} &= \frac{-\frac{I_c Z_L}{D'} + V_i + V_o}{\frac{1}{D'} \times \frac{Z_L}{R//Z_C} + D'} = \frac{(-I_c Z_L + V_i D' + V_o D')(R//Z_C)}{Z_L + D'^2 (R//Z_C)} \\
&= \frac{\left( -\frac{DV_i}{D'^2 R} \times Z_L + V_i D' + V_o D' \right) (R//Z_C) - V_i \left( 1 - \frac{DZ_L}{D'^2 R} \right) (R//Z_C)}{Z_L + D'^2 (R//Z_C)} \\
&= \frac{V_i \left( 1 - \frac{DZ_L}{D'^2 R} \right) \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)}{Z_L + D'^2 \left( \frac{RZ_C}{R+Z_C} \right)} = \frac{V_i \left( 1 - \frac{DsL}{D'^2 R} \right) \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)}{sL + D'^2 \left( \frac{R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{R + \frac{1}{sC} + r_C} \right)} \\
&= \frac{V_i R \left( 1 - \frac{DsL}{D'^2 R} \right) \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)}{sL \left( R + \frac{1}{sC} + r_C \right) + D'^2 R \left( \frac{1}{sC} + r_C \right)} = \frac{V_i R \left( 1 - \frac{DsL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{sL (RsC + 1 + r_C sC) + D'^2 R (1 + r_C sC)} \\
&= \frac{V_i R}{D'^2 R} \times \frac{\left( 1 - \frac{DsL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{\left( \frac{LRCs^2 + Ls + Lr_C Cs^2}{D'^2 R} \right) + \left( 1 + \frac{r_C CD'^2 Rs}{D'^2 R} \right)} \\
&= \frac{V_i}{D'^2} \times \frac{\left( 1 - \frac{DsL}{D'^2 R} \right) (1 + r_C sC)}{1 + \left( \frac{L + r_C CD'^2 R}{D'^2 R} \right) s + \left( \frac{LRC + Lr_C C}{D'^2 R} \right) s^2}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดให้อยู่ในรูป

$$\begin{aligned}
 \frac{v_o}{d} &= K_d \times \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{ZC}}\right) \left(1 - \frac{s}{\omega_{ZRHP}}\right)}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \\
 &= \frac{V_1}{2} \times \frac{\left(1 - \frac{DsL}{2}\right) (1 + r_c s C)}{\left(1 + \frac{L + r_c CD' R}{2} s + \frac{LRC + Lr_c C}{2} s^2\right) \left(\frac{D' R}{R}\right)} \\
 K_d &= \frac{V_1}{2} \\
 \omega_{ZC} &= \frac{1}{r_c C} \\
 \omega_{ZRHP} &= \frac{D' R}{DL} \\
 Q &= \frac{1}{\omega_0} \times \frac{D' R}{L + r_c CD' R} = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{1}{\left(\frac{L}{2} + r_c C\right) \left(\frac{D' R}{R}\right)} \\
 \omega_0 &= \sqrt{\frac{2}{LRC + Lr_c C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{2}{R + r_c}}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างวิธี Pulse width modulation และวิธี State – space

##### 4.4.1 วงจรแปลงผันแรงดัน ดิจี - ดิจี แบบบัก

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่คิดโดยวิธี Pulse width modulation

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= D \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C R}{R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{D}{LC} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1 + r_c}{CR} \right) s + \frac{1}{LC}} \right) \\
 &= \frac{D}{LC} \left( \frac{r_c C s + 1}{s^2 + \left( \frac{1 + r_c}{CR} \right) s + \frac{1}{LC}} \right) \\
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} &= V_i \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C R}{R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{V_o}{DLC} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1 + r_c}{CR} \right) s + \frac{1}{LC}} \right) \\
 &= \frac{V_o}{DLC} \left( \frac{r_c C s + 1}{s^2 + \left( \frac{1 + r_c}{CR} \right) s + \frac{1}{LC}} \right)
 \end{aligned}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่คิดโดยวิธี State – space

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} = \frac{D}{LC} \left( \frac{r_c Cs + \frac{r_c}{R} + 1}{s^2 + \left( \frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{r_c}{LCR} + \frac{1}{CL}} \right)$$

$$= \frac{D}{LC} \left( \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{1}{CL}} \right)$$

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_o}{DLC} \left( \frac{r_c Cs + \frac{r_c}{R} + 1}{s^2 + \left( \frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{r_c}{LCR} + \frac{1}{CL}} \right)$$

$$= \frac{V_o}{DLC} \left( \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{1}{CL}} \right)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบักระหว่างวิธี Pulse width modulation กับวิธี State - space

	วิธี Pulse width modulation	วิธี State - space
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)}$	$\frac{D}{LC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left(\frac{1}{CR} + \frac{r_c}{L}\right)s + \frac{1}{LC}}$	$\frac{D}{LC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left(\frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR}\right)s + \frac{1}{CL}}$
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)}$	$\frac{V_o}{DLC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left(\frac{1}{CR} + \frac{r_c}{L}\right)s + \frac{1}{LC}}$	$\frac{V_o}{DLC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left(\frac{r_c}{L} + \frac{1}{CR}\right)s + \frac{1}{CL}}$

จะพบว่าค่าที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน



## 4.4.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบวสค์

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่คิดโดยวิธี Pulse width modulation

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= \frac{1}{D'} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{D'^2}{D' L C} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right) \\
 &= \frac{D'}{L C} \left( \frac{r_c C s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right) \\
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} &= \frac{V_o}{D'^2} \left( \frac{\left( -\frac{L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( \frac{D}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{V_o D'^3}{D'^2 L C} \left( \frac{\left( -\frac{L}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right) \\
 &= \frac{V_o D'}{L C} \left( \frac{\left( -\frac{L}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี แบบบรูสเตอร์ระหว่างวิธี Pulse width modulation กับวิธี State - space

	วิธี Pulse width modulation	วิธี State - space
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)}$	$\frac{D'}{LC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} + \frac{r_c D'}{L} \right) s + \frac{D'}{CL}}$	$\frac{D'}{CL} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{D' r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{D'}{CL}}$
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)}$	$\frac{V_o D'}{LC} \frac{\left( \frac{L}{2} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} + \frac{r_c D'}{L} \right) s + \frac{D'}{CL}}$	$\frac{V_o D'}{LC} \frac{\left( \frac{L}{2} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{D' r_c}{L} + \frac{1}{CR} \right) s + \frac{D'}{CL}}$

จะพบว่าค่าที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4.2 วงจรแปลงผันแรงดัน ตีชี - ตีชี แบบบัก - บุสต์

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่คิดโดยวิธี Pulse width modulation

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} &= \frac{D}{D'} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{D D'^2}{D' L C} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right) \\
 &= \frac{D D'}{L C} \left( \frac{r_c C s + 1}{\left( \frac{1}{s} + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L} \right)} \right) \\
 \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} &= \frac{V_i}{D'^2} \left( \frac{\left( -\frac{D L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( -\frac{D L}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{\left( \frac{L R C + L r_c C}{D'^2 R} \right) s^2 + \left( \frac{L + r_c C D'^2 R}{D'^2 R} \right) s + 1} \right) \\
 &= \frac{V_o D'^3}{D D'^2 L C} \left( \frac{\left( -\frac{D L}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{\left( \frac{R + r_c}{R} \right) s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right) \\
 &= \frac{V_o D'}{D C L} \left( \frac{\left( -\frac{D L}{D'^2 R} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{C R} + \frac{r_c D'^2}{L} \right) s + \frac{D'^2}{C L}} \right)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่คิดโดยวิธี State – space

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)} = \frac{DD'}{CL} \frac{r_c Cs + \frac{r_c}{R} + 1}{s + \left(\frac{1}{CR}\right)s + \frac{D'}{CL}}$$

$$= \frac{DD'}{CL} \frac{r_c Cs + 1}{s + \left(\frac{1}{CR}\right)s + \frac{D'}{CL}}$$

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_o D'}{DCL} \frac{\left( \frac{LD r_c C}{D' R} s + \frac{LD}{D' R} + r_c C \right) s + 1}{s + \left(\frac{1}{CR}\right)s + \frac{D'}{CL}}$$

$$= \frac{V_o D'}{DCL} \frac{\left( -\frac{LD}{2} + r_c C \right) s + 1}{s + \left(\frac{1}{CR}\right)s + \frac{D'}{CL}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน คีซี - คีซี  
แบบบัก - บุกต์ระหว่างวิธี Pulse width modulation กับวิธี State - space

	วิธี Pulse width modulation	วิธี State - space
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_i(s)}$	$\frac{DD'}{LC} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} + \frac{r_c D'}{L} \right) s + \frac{D'}{CL}}$	$\frac{DD'}{CL} \frac{r_c Cs + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} \right) s + \frac{D'}{CL}}$
$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)}$	$\frac{V_o D'}{DCL} \frac{\left( \frac{DL}{2} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} + \frac{r_c D'}{L} \right) s + \frac{D'}{CL}}$	$\frac{V_o D'}{DCL} \frac{\left( -\frac{LD}{2} + r_c C \right) s + 1}{s^2 + \left( \frac{1}{CR} \right) s + \frac{D'}{CL}}$

จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่หาได้ทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

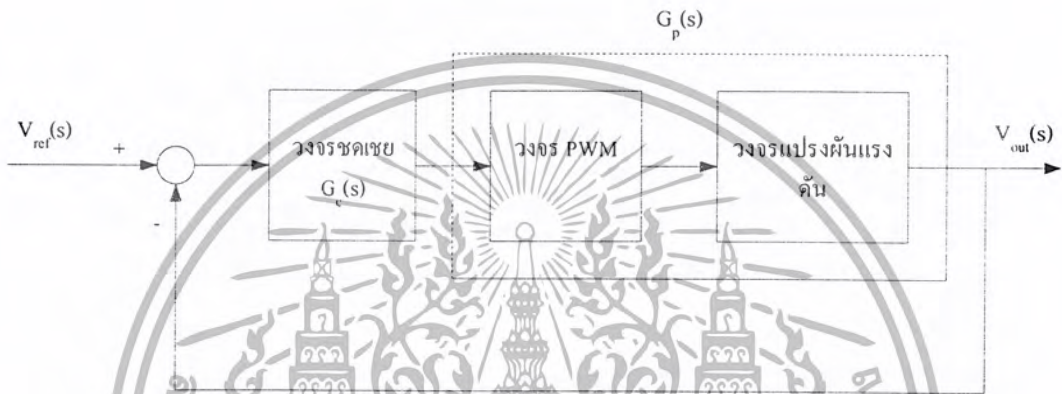
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

## การออกแบบวงจรชดเชยโดยวิธีเส้นทางราก

## 5.1 บทนำ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี และมีผลตอบสนองที่รวดเร็วการออกแบบให้บรรลุผลดังกล่าวจะต้องพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด(Close loop transfer function) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมป้อนกลับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงแสดงได้ดังสมการที่

(5.1)

$$\frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{G_c(s) \times G_p(s)}{1 + G_c(s) \times G_p(s)} \quad (5.1)$$

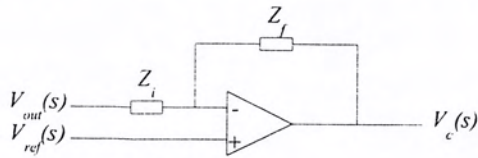
โดยจากรูปและสมการที่ (5.1) จะพบว่าส่วนประกอบที่สำคัญในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ให้ดีขึ้นนอกจากจะต้องออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันให้ดีแล้วยังมีส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือวงจรชดเชย

## 5.2 วงจรชดเชย

ในการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ไปใช้งาน แรงดันเอาต์พุตจะต้องมีค่าอยู่ในย่านที่กำหนด ถึงแม้แรงดันเอาต์พุตหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จะกระทำด้วยการป้อนกลับแบบลบดังรูปที่ 5.1 เพื่อให้ระบบปรับคิวิตซ์เกิดด้วยตัวเองอย่างอัตโนมัติ โดยที่สัญญาณควบคุมความกว้างของคิวิตซ์เกิดสร้างจากตัวขยายความผิดพลาด (Error amplifier)

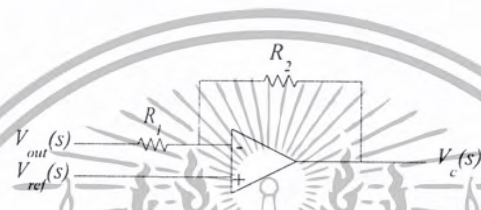
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันอ้างอิง (reference voltage) กับค่าแรงดันเอาต์พุตดังที่แสดง  
 ในรูปที่ 5.2 ระบบจะทำการปรับดิวิตไจเคิล ไปจนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 5.2 Error Amplifier

5.2.1 วงจรชดเชยแบบ P ที่สร้างจากตัวขยายความผิดพลาด



รูปที่ 5.3 วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาดแบบ P

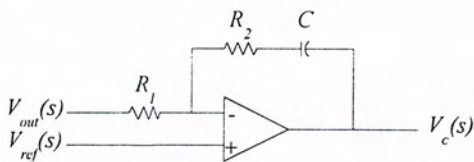
โดยวิธีการควบคุมแบบแรงดันฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดัน  
 เอาต์พุตแสดงได้ดังสมการที่ (5.2)

$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = K_c$$

(5.2)

โดย  $K_c = \frac{R_2}{R_1}$

5.2.2 วงจรชดเชยแบบ PI ที่สร้างจากตัวขยายความผิดพลาด



รูปที่ 5.4 วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาดแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถดเชยแบบ PI ที่แสดงดังรูปที่ 5.4 เป็นวงจรที่เหมาะสมสำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ โดยวิธีการควบคุมแบบแรงดัน ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตแสดงไว้ดังสมการที่ (5.3)

$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = K \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_{zc}}}{s} \right) \quad (5.3)$$

โดย  $K = \frac{1}{C_1 R_1}$ ,  $\omega_{zc} = \frac{1}{C_1 R_2}$

แม้ว่าการป้อนกลับจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้อย่างอัตโนมัติ แต่อาจเป็นเหตุให้ระบบขาดเสถียรภาพ ได้นอกจากนี้การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ อาจจะไม่เป็นที่พึงปรารถนา ดังนั้นในการออกแบบวงจรถดเชยจึงควรคำนึงถึงเสถียรภาพ, ความเร็วในการตอบสนอง, การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตและคุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะดี

### 5.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบโดยวิธีเส้นทางราก (Root - locus)

การตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุม โดยการดูเส้นทางเดินของรากของสมการคุณลักษณะ โดยจะพิจารณาจากค่าการแปรค่าของแฟคเตอร์อัตราขยาย (gain) ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด จากค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ไปจนกระทั่งค่าอนันต์ เนื่องจากตัวแปรเอสซึ่งใช้แทนตำแหน่งของรากเป็นตัวแปรเชิงซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเดินของรากจึงเป็นวิธีที่จะทราบตำแหน่งของโพลและตำแหน่งของซีโร่ของระบบแบบเปิด จากการเขียนตำแหน่งของโพลและตำแหน่งของซีโร่ลงในระนาบเอสด้วยการแปรค่าแฟคเตอร์อัตราขยายแบบเปิด และเมื่อทราบตำแหน่งโพลและตำแหน่งของซีโร่ของระบบควบคุมแบบเปิด ก็สามารถที่จะอธิบายข้อกำหนดของสมรรถนะของการควบคุมของระบบแบบปิดได้อย่างดี โดยดูได้จากเส้นทางของรากซึ่งสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB ถ้าเส้นทางรากพาดผ่านทางขวาของแกนจำนวนเชิงซ้อนบนระนาบเอสแสดงว่าระบบขาดเสถียรภาพ

ดังนั้นในการออกแบบวงจรถดเชยต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การออกแบบวงจรชดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางราก

5.4.1 การออกแบบวงจรชดเชย โดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัคโดยวงจรชดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรชดเชยแบบ P

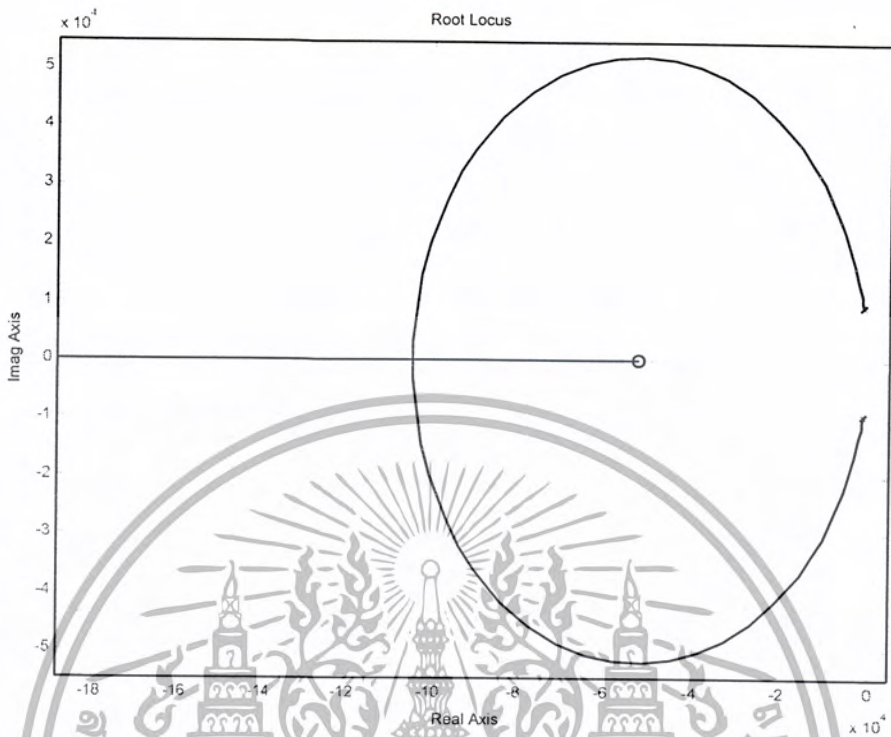
โดยในการออกแบบจะเลือกพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัคในกรณีที่แรงดันอินพุตสูงสุด ( $V_i=25V$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o=10 A$ ) มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $55 \mu H$ , ค่าความต้านทานเท่ากับ  $5 \Omega$ , ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.095 \Omega$  และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $200 \mu F$  โดยนำค่าเหล่านี้ไปแทนฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซี - ดิซี แบบบัคระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับดิวิตีไซเคิล โดยใช้วิธี Pulse width modulation

$$\frac{\hat{v}_o}{d} = \frac{V_i}{1.8} \times \frac{(1+r_c s C)}{1 + \left( \frac{L+r_c C R}{R} \right) s + \left( \frac{LRC+Lr_c C}{R} \right) s^2}$$

แทนค่าต่างๆ แล้วได้ดังสมการที่ (5.4)

$$G_p(s) = \frac{V_o(s)}{d} = 0.5556 \times \left( \frac{0.000475s + 25}{(1.121 \times 10^{-8})s^2 + (3 \times 10^{-5})s + 1} \right) \quad (5.4)$$

นำสมการที่ (5.4) ที่ได้มาหาเส้นทางเดินราก โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อดูเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 5.5 เส้นทางรากของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถ่ายแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัก

จากรูปจะเห็นว่าระบบมีเสถียรภาพอยู่แล้ว แต่ถ้ามีวงจรถดเชยจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น โดยการออกแบบวงจรถดเชยแบบ P จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (5.2)

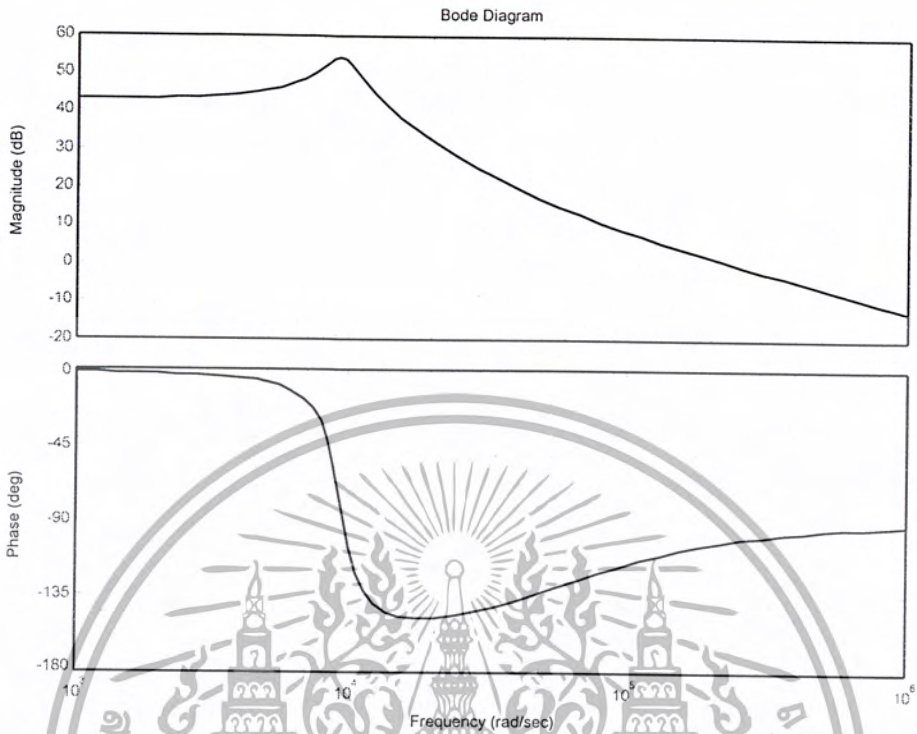
$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = K_c$$

เมื่อนำวงจรถดเชยไปใส่ในระบบจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบใหม่ดังนี้

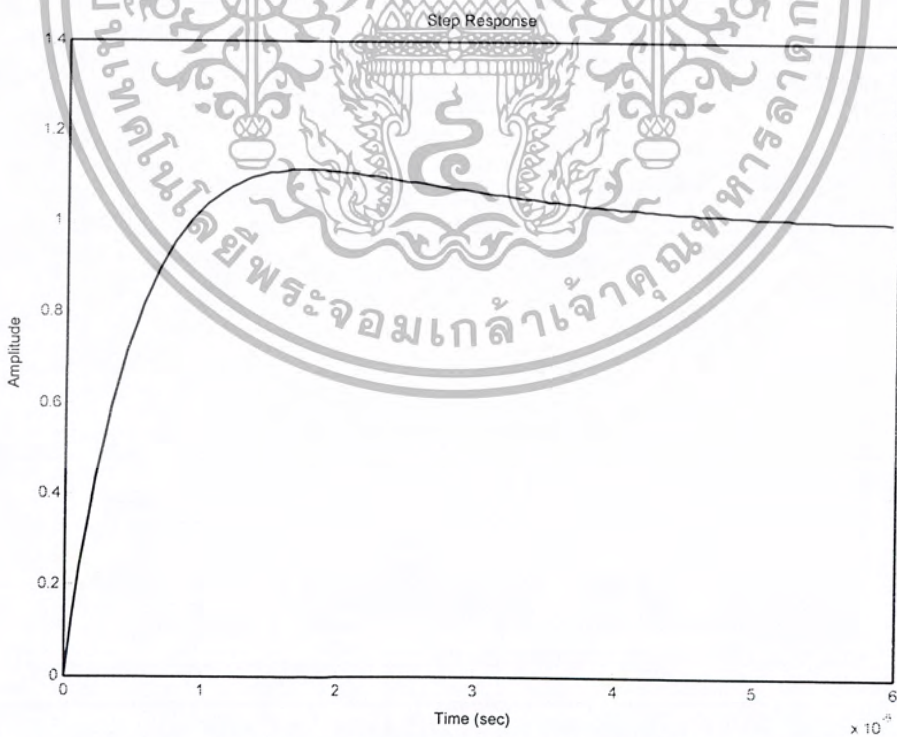
$$\frac{V_{out}}{V_{ref}} = K_c \times 0.5556 \times \left( \frac{0.000475s + 25}{(1.121 \times 10^{-8})s^2 + (3 \times 10^{-5})s + 1} \right) \quad (5.5)$$

นำสมการที่ (5.5) ไปสมมติค่า  $K_c$  โดยให้  $K_c=10$  แล้วนำไปเขียนกราฟโพล และ step response

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



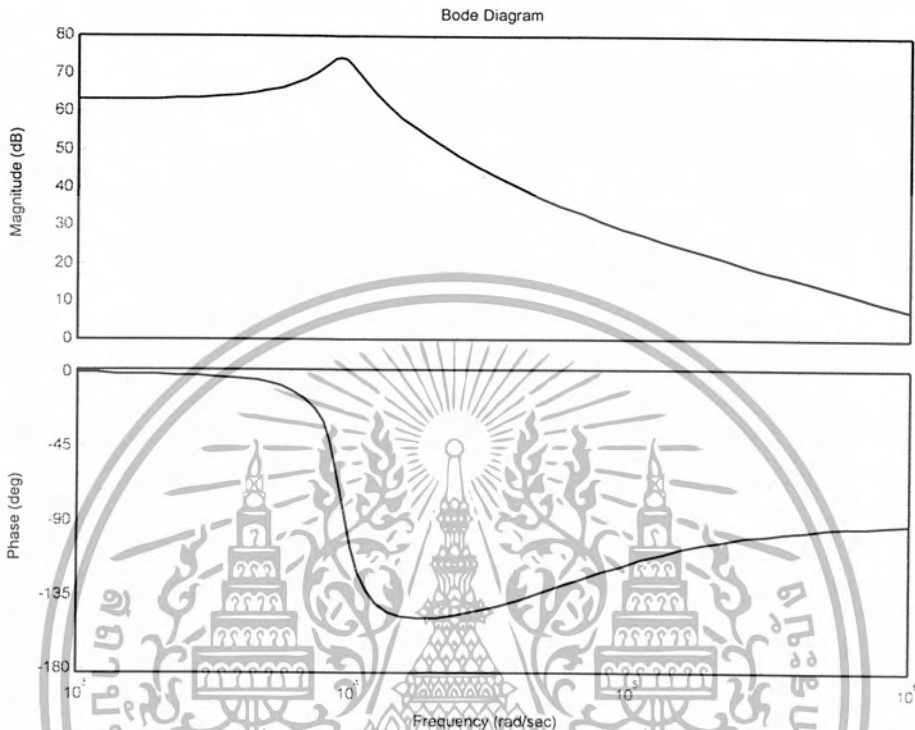
รูปที่ 5.6 กราฟโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบั๊กโดยให้  $K_c=10$



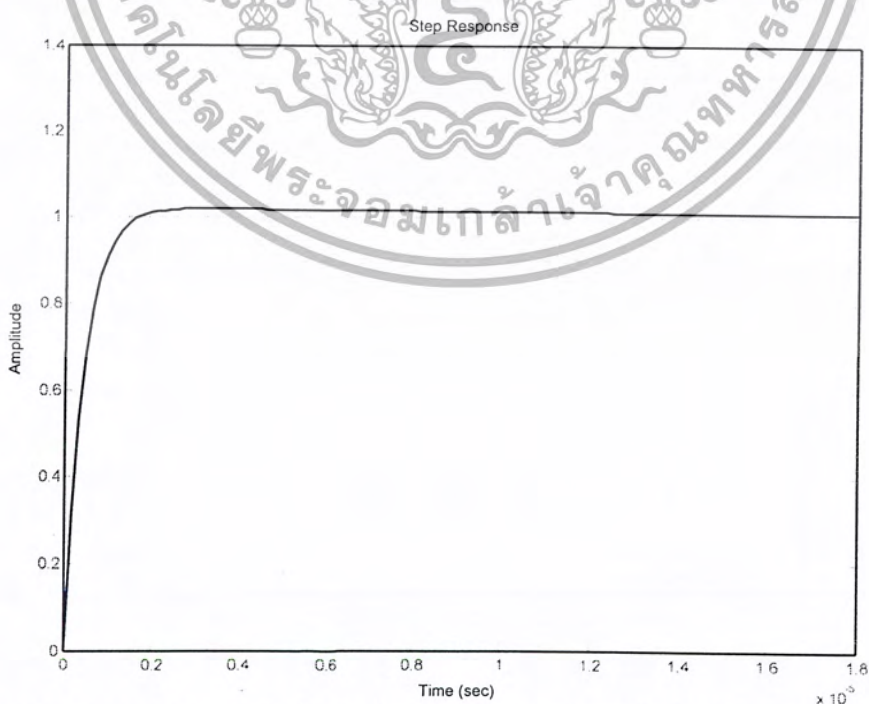
รูปที่ 5.7 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบั๊กเมื่อ  $K_c=10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนค่า  $K_c$  ให้มากขึ้นเพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $K_c$  ค่าอื่นๆ ว่าค่าใดจะให้ผลตอบสนองได้ดีกว่ากัน โดยให้  $K_c=100$  แล้วนำไปเขียนกราฟโบดและ step response



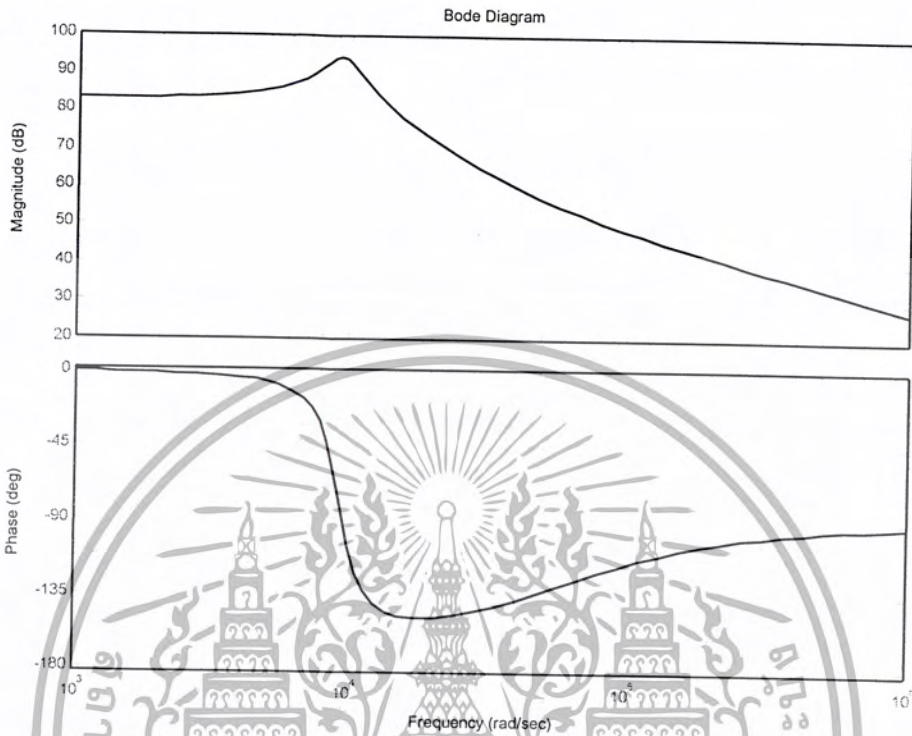
รูปที่ 5.8 กราฟโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบักโดยให้  $K_c=100$



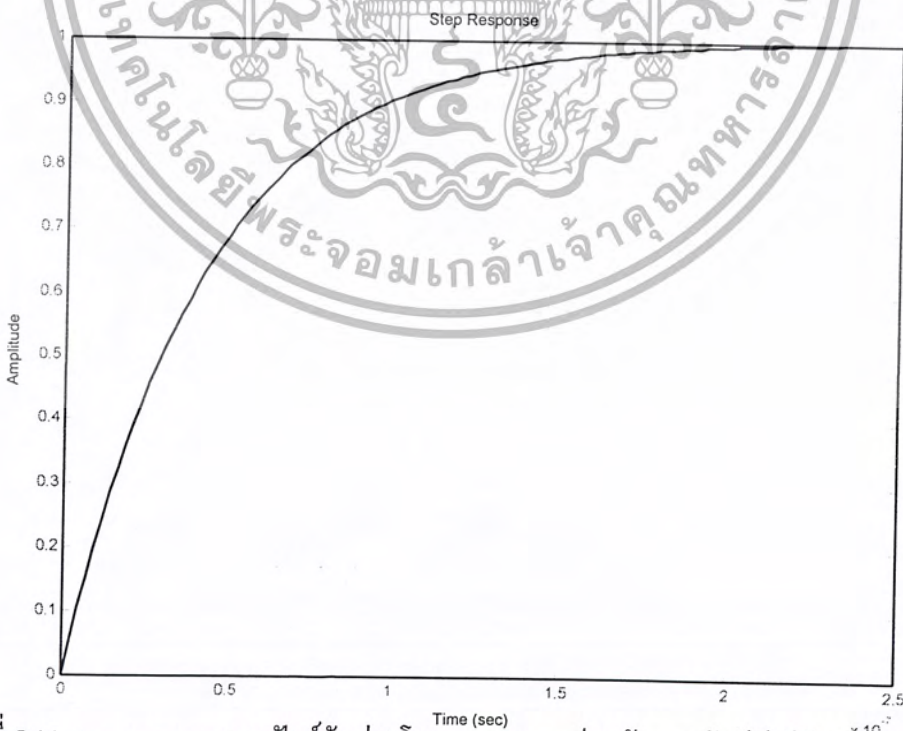
รูปที่ 5.9 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบักโดยให้  $K_c=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปลี่ยนค่า  $K_c$  อีกครั้ง โดยให้  $K_c=1000$  แล้วนำไปเขียนกราฟโบดและ step response



รูปที่ 5.10 กราฟโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบักโดยให้  $K_c=1000$



รูปที่ 5.11 step response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบักเมื่อ  $K_c=1000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปทั้งหมดจะพบว่าในการออกแบบด้วยวงจรถดเชยแบบ P ไม่เหมาะสม เพราะว่าค่า  $K_c$  ยิ่งมากอาจทำให้ระบบตอบสนองได้ดีขึ้น แต่ขาดเสถียรภาพ เนื่องจากแบนด์วิดธ์ของระบบหรือค่าของความถี่ครอสโอเวอร์ ( $f_c$ ) มากเกินไป จึงทำให้ระบบตอบสนองสัญญาณที่สูงมากได้ดี โดยเฉพาะสัญญาณรบกวน ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งในการออกแบบจริงๆ แล้วควรได้ค่า  $f_c$  ที่มีค่ามากเพราะจะได้ทำการตอบสนองแต่ไม่ควรที่จะมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป

ดังนั้นวิธีการออกแบบด้วยวงจรถดเชยแบบ P จึงไม่สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ จึงทำการออกแบบด้วยวงจรถดเชยแบบ PI แทน

5.4.2 การออกแบบวงจรถดเชย โดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัคโดยวงจรถดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรถดเชยแบบ PI

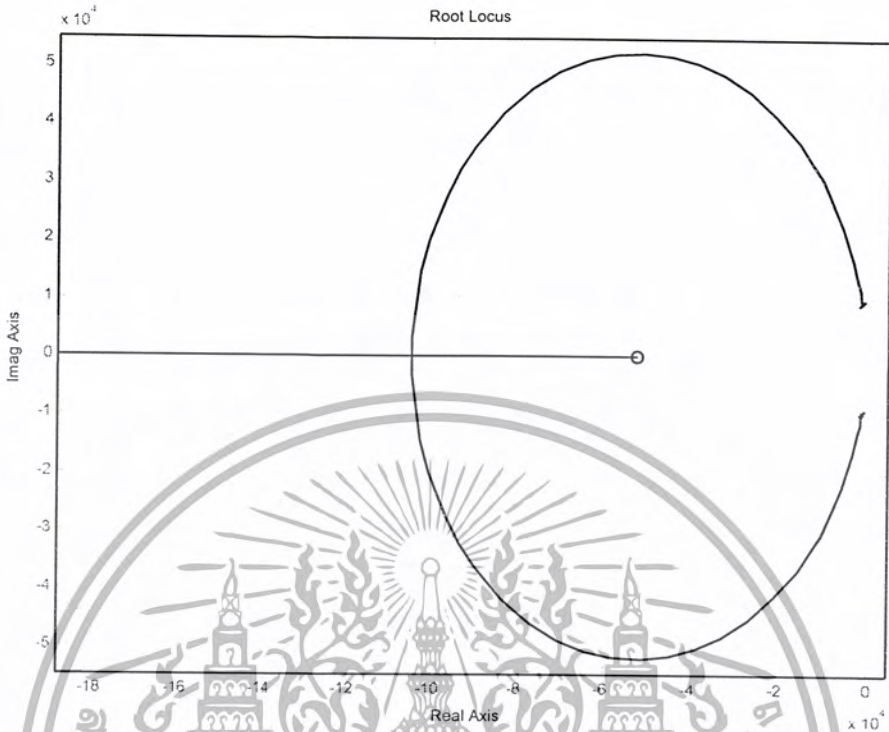
โดยในการออกแบบจะเลือกพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัคในกรณีที่แรงดันอินพุตสูงสุด ( $V_i=25V$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o=20 A$ ) มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $55 \mu H$ , ค่าความต้านทานเท่ากับ  $5 \Omega$ , ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.095 \Omega$  และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $200 \mu F$  โดยนำค่าเหล่านี้ไปแทนฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบัคระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับดิวิตีไซเคิลโดยใช้วิธี Pulse width modulation

$$\frac{v_o}{d} = \frac{V_i}{1.8} \times \frac{(1+r_c s C)}{1 + \left( \frac{L+r_c C R}{R} \right) s + \left( \frac{L R C + L r_c C}{R} \right) s^2}$$

แทนค่าต่างๆ จะได้สมการที่ (5.6)

$$G_p(s) = \frac{V_o(s)}{d} = 0.5556 \times \left( \frac{0.000475s + 25}{(1.121 \times 10^{-8})s^2 + (3 \times 10^{-5})s + 1} \right) \quad (5.6)$$

นำสมการที่ (5.6) ที่ได้มาหาเส้นทางเดินราก โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อดูเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 5.12 เส้นทางการากของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัก

จากรูปจะเห็นว่าระบบมีเสถียรภาพอยู่แล้ว แต่ถ้ามีวงจรชดเชยจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้นโดยทำการออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตดังสมการ

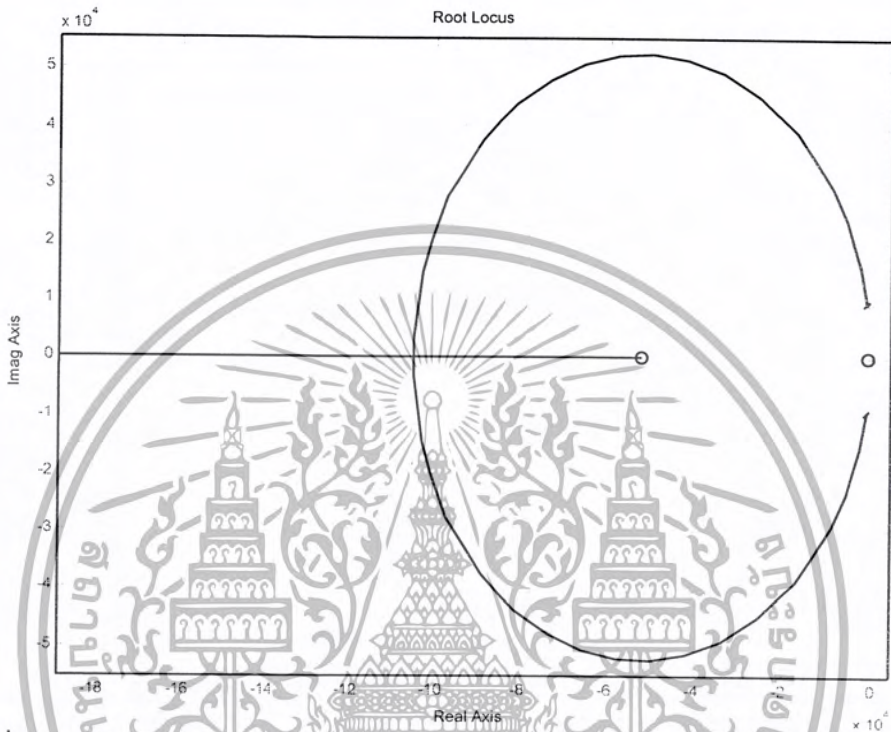
$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = \frac{k}{\omega_{zc}} \left( \frac{s + \omega_{zc}}{s} \right) \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.7) จะทำการออกแบบตัวชดเชยดังนี้

ทำการเลือกค่าซีโรของตัวชดเชย  $\omega_{zc}$  โดยในการเลือกค่าซีโร จะเลือกค่าที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพ เพราะค่าที่ใกล้แกนจินตภาพจะทำให้เกิดโพลเด่น ทำให้ค่าโพลอื่นๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ จากเส้นทางการาก จึงเลือกค่า  $1 \times 10^3$  มาเป็นค่าซีโรแล้วนำค่าซีโรตัวนี้ไปแทนในตัวชดเชยโดย

ไม่สนใจค่า  $\frac{k}{\omega_{z_c}}$  โดยให้ค่า  $\frac{k}{\omega_{z_c}} = 1$  แล้วนำตัวชเลขนี้ไปใส่ในระบบ จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่าย

โอนตัวใหม่ แล้วนำเขียนเส้นทางรากเพื่อดูเสถียรภาพของระบบ

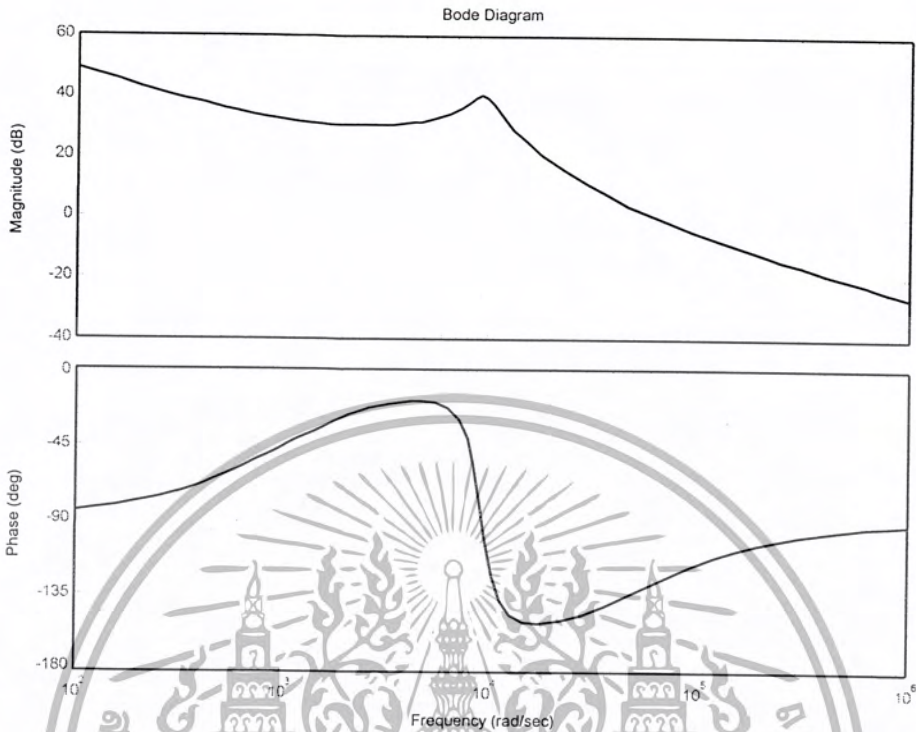


รูปที่ 5.13 เส้นทางรากของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงต้นแรงดันดิซ-ดิซแบบบักเมื่อ

$$\omega_{z_c} = 1000$$

จะเห็นว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพ ต่อไปทำการเลือกค่าเกน  $\frac{k}{\omega_{z_c}}$  โดยค่าเกนที่เลือกควร

จะมีค่าต่ำๆ เพื่อให้ระบบยังคงความเป็นวงจรรองความถี่ต่ำ โดยเลือกให้มีค่าเท่ากับ 2 แล้วจึงนำค่าเกนกับค่าซีโรที่เลือกมาไปเขียนกราฟโพลเพื่อทำการตรวจสอบ



รูปที่ 5.14 กราฟโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบ

$$\text{บักเมื่อ } \omega_{Z_c} = 1000 \text{ และ } \frac{k}{\omega_{Z_c}} = 2$$

จากกราฟโบดจะพบว่า วงจรชดเชยแบบ PI ที่ออกแบบ นอกจากทำให้ระบบมีเสถียรภาพแล้ว ยังทำให้ระบบยังคงความเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำโดยมีค่าเฟสมาจันประมาณ 60 องศา และ อัตราขยายความถี่ประมาณ 50 เดซิเบล

จากสมการวงจรถบายความถี่พลาดแบบ PI จะมีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = K \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_{Z_c}}}{s} \right) = \frac{K}{\omega_{Z_c}} \left( \frac{s + \omega_{Z_c}}{s} \right)$$

$$\text{โดย } K = \frac{1}{C_1 R_1}, \quad \omega_{Z_c} = \frac{1}{C_1 R_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_{z_c} = 1 \times 10^3$$

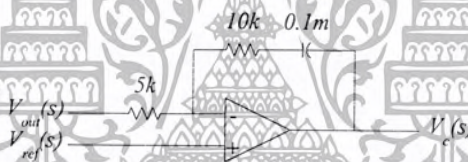
$$\frac{1}{C_1 R_2} = 1 \times 10^3$$

ให้  $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$  แล้ว  $R_2 = 10 \text{k}\Omega$

$$\frac{K}{\omega_{z_c}} = \frac{R_2}{R_1}$$

แล้ว  $R_1 = 5 \text{k}\Omega$

จากค่า  $C_1$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  ที่หามาได้นำไปออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI โดยใช้วงจรถบายความผิดพลาด จะได้วงจรถดเชยดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.15 วงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซีแบบบัค

จากวงจรถดเชยที่ออกแบบได้ จะนำไปทดลองกับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค และเก็บผลการทดลองเพื่อดูว่าวงจรถดเชยที่ออกแบบสามารถนำไปใช้ได้จริง

#### 5.4.3 การออกแบบวงจรถดเชยโดยใช้วิธีเส้นทางรากสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซีแบบบูสต์โดยวงจรถดเชยที่จะเลือกนำมาออกแบบคือวงจรถดเชยแบบ PI

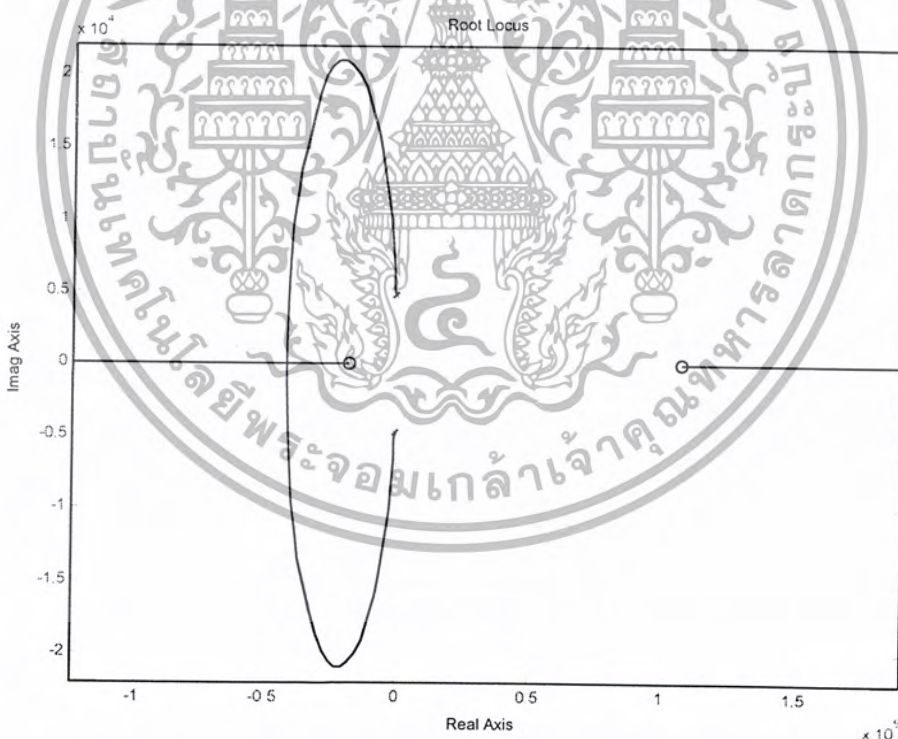
โดยในการออกแบบจะเลือกพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบูสต์ในกรณีที่แรงดันอินพุตสูงสุด ( $V_i = 10\text{V}$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o = 3 \text{A}$ ) มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $62 \mu\text{H}$ , ค่าความต้านทานเท่ากับ  $15 \Omega$ , ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.187 \Omega$  และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $300 \mu\text{F}$  โดยนำค่าเหล่านี้ไปแทนฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบูสต์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับดิวิตีไซเคิลโดยใช้วิธี Pulse width modulation

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = \frac{0.015}{1.8} \times \frac{V_i}{D^2} \times \frac{\left(1 - \frac{sL}{D^2 R}\right)(1 + r_c sC)}{1 + \left(\frac{L + r_c CD^2 R}{D^2 R}\right)s + \left(\frac{LRC + Lr_c C}{D^2 R}\right)s^2}$$

แทนค่าต่างๆ จะได้สมการที่ (5.8)

$$G_p(s) = \frac{V_o(s)}{d} = 0.0083 \times \left( \frac{(-1.174 \times 10^{-8})s^2 + 0.001053s + 22.5}{(4.237 \times 10^{-8})s^2 + (6.54 \times 10^{-5})s + 1} \right) \quad (5.8)$$

นำสมการที่ (5.8) ที่ได้มาหาเส้นทางเดินราก โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อดูเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 5.16 เส้นทางรากของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบัสต์

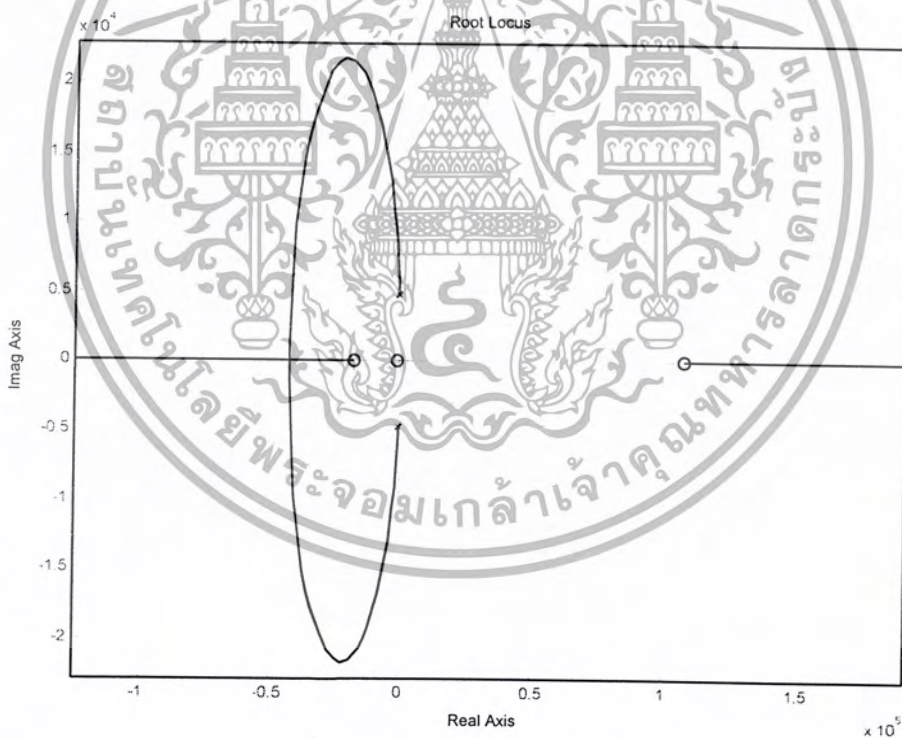
จากรูปจะพบว่า ระบบไม่มีเสถียรภาพจึงต้องการออกแบบตัวชดเชยเพื่อให้เกิดเสถียรภาพในระบบจึงทำการออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = \frac{k}{\omega_{z_c}} \left( \frac{s + \omega_{z_c}}{s} \right) \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.9) จะทำการออกแบบตัวชดเชยดังนี้

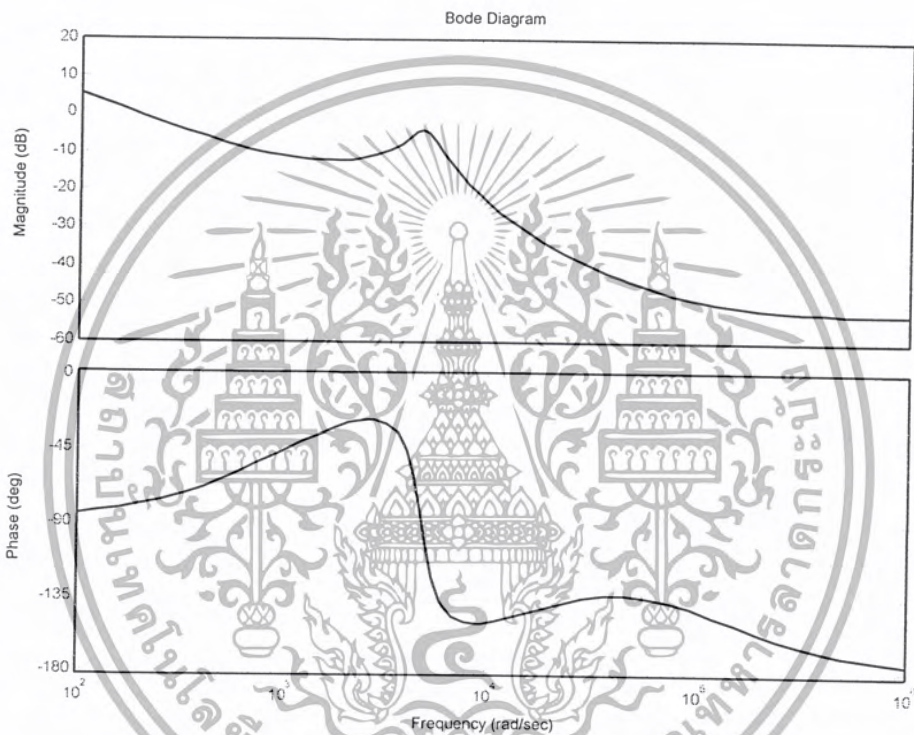
ทำการเลือกค่าซีโรของตัวชดเชย  $\omega_{z_c}$  โดยในการเลือกค่าซีโร จะเลือกค่าที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพ เพราะค่าที่ใกล้แกนจินตภาพจะทำให้เกิดโพลเด่น ทำให้ค่าโพลอื่นๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ จากเส้นทางราก จึงเลือกค่า  $1 \times 10^3$  มาเป็นค่าซีโรแล้วนำค่าซีโรตัวนี้ไปแทนในตัวชดเชยโดยไม่สนใจค่า  $\frac{k}{\omega_{z_c}}$  โดยให้ค่า  $\frac{k}{\omega_{z_c}} = 1$  แล้วนำตัวชดเชยนี้ไปใส่ในระบบ จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวใหม่ แล้วนำเขียนเส้นทางรากเพื่อดูเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 5.17 เส้นทางรากของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันคิตซี-คิตซีแบบบัสต์เมื่อ

$$\omega_{z_c} = 1000$$

ต่อไปทำการเลือกค่าเกน  $\frac{k}{\omega_{z_c}}$  โดยค่าเกนที่เลือกควรจะมีค่าต่ำๆ เพื่อให้ระบบยังคงความเป็นวงจรรองความถี่ต่ำ โดยเลือกให้มีค่าเท่ากับ 1 แล้วจึงนำค่าเกนกับค่าซีโรที่เลือกมาไปเขียนกราฟโบด



รูปที่ 5.18 กราฟโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบ บั๊กเมื่อ

$$\omega_{z_c} = 1000 \text{ และ } \frac{k}{\omega_{z_c}} = 2$$

จากกราฟโบดจะพบว่า วงจรชดเชยแบบ PI ที่ออกแบบ นอกจากทำให้ระบบมีเสถียรภาพแล้ว ยังทำให้ระบบยังคงความเป็นวงจรรองความถี่ต่ำโดยมีค่าเฟสมาจินประมาณ 100 องศา และ อัตราขยายความถี่ประมาณ 5 เดซิเบล

จากสมการวงจรรขยายความผิดพลาดแบบ PI จะมีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{V_c(s)}{V_o(s)} = K \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z_c}}}{s} \right) = \frac{K}{\omega_{z_c}} \left( \frac{s + \omega_{z_c}}{s} \right)$$

โดย  $K = \frac{1}{C_1 R_1}$  ,  $\omega_{z_c} = \frac{1}{C_1 R_2}$

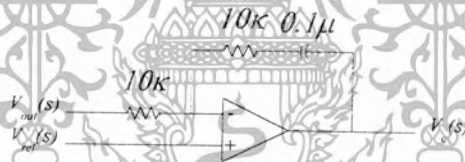
$$\omega_{z_c} = 1 \times 10^3$$

$$\frac{1}{C_1 R_2} = 1 \times 10^3$$

ให้  $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$  แล้ว  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

แล้ว  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$

จากค่า  $C_1, R_1, R_2$  ที่หามาได้นำไปออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI โดยใช้วงจรขยายความ  
ผิดพลาด จะได้วงจรชดเชยดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.19 วงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดัน คณิตศาสตร์ - คณิตศาสตร์ แบบบูลต์

จากวงจรชดเชยที่ออกแบบได้ จะนำไปทดลองกับวงจรแปลงผันแรงดัน คณิตศาสตร์ - คณิตศาสตร์  
แบบบูลต์ และเก็บผลการทดลองเพื่อดูว่าวงจรชดเชยที่ออกแบบสามารถนำไปใช้ได้จริง

## บทที่ 6

### การทดลอง ผลการทดลอง วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

#### 6.1 บทนำ

จะทำการนำวงจรชดเชยที่ทำการออกแบบในบทที่ 5 คือ วงจรชดเชยแบบ PI ของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบัก กับของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี - คัตซีแบบบูสต์ ไปใช้กับวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบักกับวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบูสต์ เพื่อเก็บผลการทดลองโดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่

1. Digital Oscilloscope ของ Yokogawa รุ่น DL1520 จำนวน 1 เครื่อง
2. DC Power Supply ของ Kikusui รุ่น PAD35-10L จำนวน 1 เครื่อง
3. DC Power Supply ของ Analab รุ่น APS-1 จำนวน 1 เครื่อง
4. Digital Multimeter ของ Tektronix รุ่น DMM254 จำนวน 1 เครื่อง

#### 6.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

##### 6.2.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบักวิธีการทดลอง

1. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
2. จ่ายแรงดัน 20 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตที่กระแสเอาต์พุต I<sub>i</sub> 2,4,6,8 และ 10 A ตามลำดับ
4. จ่ายแรงดัน 25 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลังแล้วทำการทดลองตามข้อที่ 3.

##### ผลการทดลอง

I <sub>o</sub> (A)	V <sub>o</sub> (V)	
	V <sub>i</sub> =20V	V <sub>i</sub> =25V
1	5.003	5.003
2	4.998	4.998
4	4.987	4.988
6	4.977	4.978
8	4.967	4.968
10	4.957	4.959

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันคัตซี-คัตซีแบบบักในโหมด CCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์

### วิธีการทดลอง

1. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
2. จ่ายแรงดัน 10 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A และ 3 A ตามลำดับ

### ผลการทดลอง

$I_o$ (A)	$V_o$ (V)
	$V_i=10V$
1	14.94
3	14.89

ตารางที่ 6.2 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์ในโหมด CCM

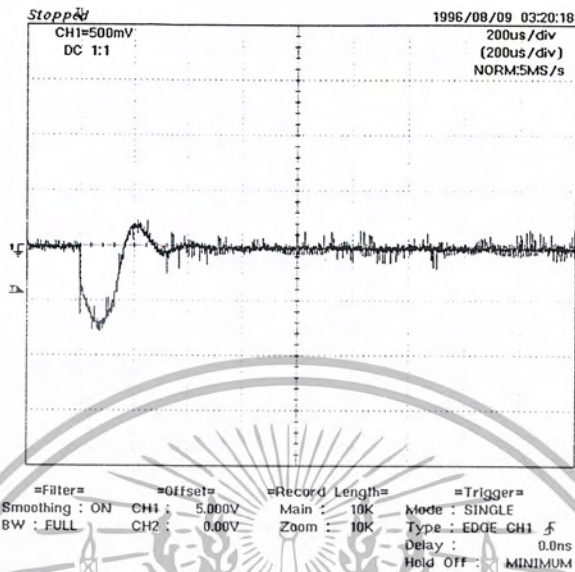
## 6.3 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต

### 6.3.1 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค

#### วิธีการทดลอง

1. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
2. จ่ายแรงดัน 25 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 1 A ไปเป็น 5 A

## ผลการทดลอง



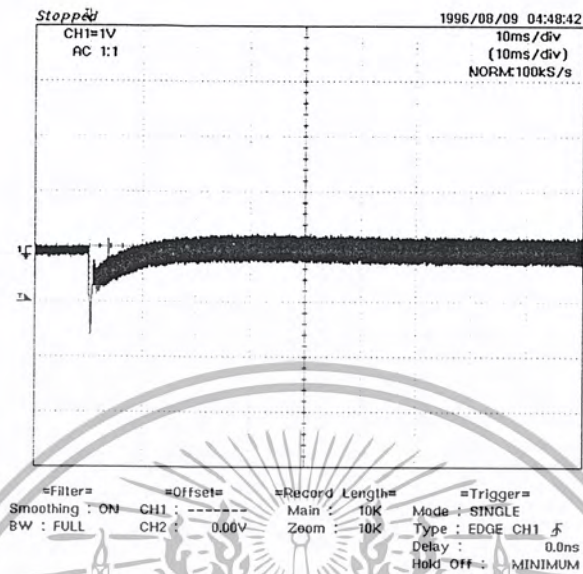
รูปที่ 6.1 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัค

### 6.3.2 การทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบูสต์

#### วิธีการทดลอง

1. จ่ายแรงดัน 15 V จาก DC Power Supply รุ่น APS-1 ให้กับวงจรควบคุม
2. จ่ายแรงดัน 25 V จาก DC Power Supply รุ่น PAD35-10L ให้กับวงจรภาคกำลัง
3. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 1 A ไปเป็น 4 A

## ผลการทดลอง



รูปที่ 6.2 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดิซ-ดิซแบบบูสต์

## 6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI เพื่อนำไปใช้กับวงจรแปลงผันแรงดันดิซ-ดิซแบบบัก และวงจรแปลงผันแรงดันดิซ-ดิซแบบบูสต์ซึ่งแสดงผลไว้ในบทนี้ มีผลดังต่อไปนี้

1. วงจรชดเชยที่ออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซ - ดิซ แบบบัก มีการรักษาแรงดันเอาต์พุตได้ดี โดยเฉพาะในช่วงที่มีกระแสเอาต์พุตต่ำ
2. วงจรชดเชยที่ออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซ - ดิซ แบบบูสต์ มีการรักษาแรงดันเอาต์พุตได้ดี โดยเฉพาะในช่วงที่มีกระแสเอาต์พุตต่ำ
3. วงจรชดเชยที่ออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซ - ดิซ แบบบัก มีการตอบสนองได้ดีเมื่อค่ากระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 1 แอมป์ ไปเป็น 5 แอมป์
4. วงจรชดเชยที่ออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันแรงดัน ดิซ - ดิซ แบบบูสต์ มีการตอบสนองได้ดีเมื่อค่ากระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจาก 1 แอมป์ ไปเป็น 3 แอมป์

## 6.5 สรุปผลการทดลอง

การออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI ที่นำไปใช้กับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี โดยวิธีเส้นทางของรากล โดยทำการหาค่าซีโรและค่าเกนของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชย โดยหาได้จากเส้นทางของรากลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด แล้วนำไปตรวจสอบด้วยแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด จะพบว่าทั้งวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบัค กับวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบูสต์ มีเสถียรภาพซึ่งดูได้จากเฟสมาจิ้นและเกนมาจิ้นของแผนภาพโบล รวมทั้งยังมีอัตราการขยายที่ความถี่ต่ำมีค่ามาก ทำให้ระบบยังคงความเป็นวงจรรองความถี่ต่ำ และเมื่อนำมาทดลองวงจรชดเชยแบบ PI สามารถทำการตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของกระแสเอาต์พุต การออกแบบวงจรชดเชยแบบ PI โดยวิธีเส้นทางของรากล ถือว่าได้ผลดีและออกแบบได้ง่าย สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรชดเชยของวงจรแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซีต่อไป



## ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างเส้นทางรากและแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของ  
วงจรถ่ายแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี

ก.1 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างเส้นทางรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถ่ายแปลงผันแรงดัน ดีซี – ดีซี แบบบักรูปที่

$L=55/1000000;$

$rc=0.095;$

$C=200/1000000;$

$V_o=5;$

$V_s=1.8;$

$R=5;$

$V_i=25;$

$d=V_o/V_i;$

$K=V_i;$

$tf1=K*rc*C;$

$tf2=K;$

$tf3=(L*R*C+L*rc*C)/R;$

$tf4=(L+rc*C*R)/R;$

$tf5=1;$

$s=(1/V_s)*tf([tf1 tf2],[tf3 tf4 tf5]);$

$rlocus(s);$



ก.2 โปรแกรม MATLAB สำหรับแผนภาพโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลง  
ผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบักรูปที่

```

L=55/1000000;
rc=0.095;
C=200/1000000;
Vo=5;
Vs=1.8;
R=5;
Vi=25;
d=Vo/Vi;
K=Vi;
tf1=K*rc*C;
tf2=K;
tf3=(L*R*C+L*rc*C)/R;
tf4=(L+rc*C*R)/R;
tf5=1;
s=(1/Vs)*tf([tf1 tf2],[tf3 tf4 tf5]);
bode(s);

```



ก.3 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างเส้นทางรอกของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจร  
แปลงผันแรงดัน ดีซี - ดีซี แบบบิวสโวลต์

```
L=62/1000000;
rc=0.187;
C=300/1000000;
Vo=15;
Vs=1.8;
R=15;
Vi=10;
d=1-(Vi/Vo);
K=Vi/((1-d)*(1-d));
tf0=K*((-L)*rc*C/((1-d)*(1-d)*R));
tf1=K*((-L)/((1-d)*(1-d)*R))+rc*C;
tf2=K;
tf3=(L*R*C+L*rc*C)/((1-d)*(1-d)*R);
tf4=(L+rc*C*(1-d)*(1-d)*R)/((1-d)*(1-d)*R);
tf5=1;
s=(0.015/Vs)*tf([tf0 tf1 tf2],[tf3 tf4 tf5]);
rlocus(s);
```



ก.4 โปรแกรม MATLAB สำหรับแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลง  
ผันแรงดัน คีซี – คีซี แบบบรูสเตอร์รูปที่

```
L=62/1000000;
rc=0.187;
C=300/1000000;
Vo=15;
Vs=1.8;
R=15;
Vi=10;
d=1-(Vi/Vo);
K=Vi/((1-d)*(1-d));
tf0=K*((-L)*rc*C/((1-d)*(1-d)*R));
tf1=K*(((1-d)*((1-d)*R)+rc*C);
tf2=K;
tf3=(L*R*C+L*rc*C)/((1-d)*(1-d)*R);
tf4=(L+rc*C*(1-d)*(1-d)*R)/((1-d)*(1-d)*R);
tf5=1;
s=(0.015/Vs)*tf([tf0 tf1 tf2],[tf3 tf4 tf5]);
bode(s);
```



### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ ชรินทร์ บุญลักษณานุสรณ์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกๆทาง ขอขอบคุณบิดา มารดาของผู้จัดทำ ผู้คอยให้แรงใจตลอดเวลา และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อ้างอิง

Robert W. Erickson, Dragon Maksimovic, Fundamentals of power Electronics, second edition,  
Kluwer Academic Publishers, 2001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้