





ชื่อหัวข้อโครงการ	ตัวลดไฟกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายนพรัตน์ สมพรพันธ์	รหัส 50361323	
	นายนิชนันท์ ชูประสิทธิ์	รหัส 50361484	
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2553		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโครงการเกี่ยวกับการสร้างตัวลดไฟกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง แนวคิดการดำเนินงานโครงการนี้ได้มาจากขณะเริ่มเดินแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้แก่โหลดจะมีการกระชากของกระแส และแรงดันเริ่มต้นสูง ส่งผลทำให้เกิดประกายไฟที่บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ จนทำให้เกิดความร้อน ผลของความร้อนอาจทำให้น้ำสัมผัสของทองแดงหลุด จึงเป็นเหตุทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์สั้นลง การสร้างตัวลดไฟกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง จะช่วยลดการกระชากของกระแส และแรงดันในขณะเริ่มเดินแหล่งจ่ายไฟให้ต่ำลง โดยอาศัยการปรับค่าของแรงดันเริ่มต้นเดินแหล่งจ่ายไฟให้เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงระดับที่โหลดต้องการ ตัวลดไฟกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยวงจรคุมค่าแรงดันคงที่แบบปรับค่าได้ และวงจรควบคุมกระแส สามารถรับแรงดันเข้าได้ไม่เกิน 40 V และสามารถปรับค่าแรงดันออกได้ในช่วง 1.25 – 37 V โดยมีค่ากระแสสูงสุด 1.5 A

**Project title**            A Soft Starter/Stopper for DC Power Supplies

**Name**                    Mr. Noppharat Somphonpan            ID. 50361323

                                 Mr. Nichanan Chupasit                ID. 50361484

**Project advisor**        Mr. Niphat Jantharamin, Ph.D.

**Major**                    Electrical Engineering

**Department**            Electrical and Computer Engineering

**Academic year**        2010

---

### Abstract

This thesis presents a project that deals with construction of a soft starter/stopper for DC supplies. The aim of this project is to suppress a large increase in load current and voltage at the start of the supplies. The so-called current surge causes electric arc and consequently heat around device connection. The generated heat may cause copper contacts of the device to lose and therefore their service life to be shortened. The soft starter/stopper for DC supplies could accordingly avoid the aforementioned voltage surge by gradually increasing the supplied voltage until the desired load voltage is reached. The circuit constructed in this project consists of an adjustable voltage regulator and a current limiter which accepts an input voltage up to 40 V and gives an output voltage in 1.25 – 37 V range with a maximum current of 1.5 A.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และให้ความกรุณาในการตรวจทานปริญญานิพนธ์ คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบคุณคุณมนทนต์ ฝึกแอม และคุณณัฐภัทร มัทย์พงษ์दार ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับอุปกรณ์ในระหว่างดำเนินโครงการ

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรักความเมตตา สติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้ และขอขอบคุณทุก ๆ คน ในครอบครัวของคุณผู้ดำเนินโครงการที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายพรรัตน์ สมพรพันธ์

นายนิชนันท์ ชูประสิทธิ์

# สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ไฟกระชาก.....	4
2.2 วงจรอันดับที่หนึ่ง.....	6
2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ.....	6
2.2.2 ตัวเก็บประจุ.....	7
2.3 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RL และวงจร RC.....	9
2.3.1 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RL.....	9
2.3.2 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC.....	13
2.4 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RL และ RC.....	15
2.4.1 ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยของแหล่งจ่ายแบบขึ้น.....	15
2.4.2 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RL สำหรับสัญญาณเข้าแบบขึ้น.....	17
2.4.3 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RC สำหรับสัญญาณเข้าแบบขึ้น.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ผลตอบสนองชั่วคราว.....	22
2.5.1 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณอิมพัลส์ .....	23
2.5.2 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณขั้นบันได.....	23
2.5.3 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณลาด .....	25
2.6 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....	26
2.7 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล โดยใช้ไอซี LM317 .....	26
2.7.1 ตัวคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ LM317 .....	27
2.7.2 ทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907 .....	28
<b>บทที่ 3 การสร้างวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....</b>	<b>31</b>
3.1 การออกแบบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....	31
3.2 วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้.....	32
3.3 วงจรควบคุมกระแส.....	33
3.4 การทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล.....	34
3.5 การพัฒนางจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล.....	35
3.6 การประกอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล.....	36
3.7 การทดลองวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....	37
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ .....</b>	<b>43</b>
4.1 การทดสอบตัวคุมค่าแรงดันแบบปรับค่าได้ LM317.....	43
4.2 การทดสอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....	44
4.2.1 การปรับแรงดันเข้า โดยกำหนดให้แรงดันออกคงที่.....	45
4.2.2 การปรับแรงดันออก โดยกำหนดให้แรงดันเข้าคงที่.....	45
4.3 การทดสอบจ่ายโหลดประเภทต่าง ๆ .....	46
4.3.1 โหลดตัวต้านทาน.....	46
4.3.2 โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ.....	50
4.3.3 โหลดมอเตอร์ฟัดัก 12 V .....	52

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการดำเนิน โครงการ.....	59
5.2 ปัญหา และแนวทางแก้ไข.....	59
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก รายละเอียดของตัวคุมค่าแรงคั้นหมายเลข LM317.....	62
ภาคผนวก ข รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907.....	72
ประวัติผู้ดำเนิน โครงการ.....	77





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะของไฟกระชากตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 .....	4
4.1 ค่ากระแสออกและแรงดันออกของตัวคุมค่าแรงดันปรับค่าได้.....	44
4.2 ผลตอบสนองชั่วครู่เมื่อแรงดันออกคงที่ .....	45
4.3 ผลตอบสนองชั่วครู่เมื่อแรงดันเข้าคงที่ 20 V .....	46
4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว.....	48
4.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กรณี โหลด RL ( $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ ) .....	52
4.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กรณี โหลด RL ( $L = 0.28 \text{ mH}$ ).....	52
4.7 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของมอเตอร์พิกัด 12 V.....	54



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปตัวอย่างของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง .....	5
2.2 วงจร RL สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ [2].....	9
2.3 วงจร RL เมื่อ $t \geq 0$ .....	10
2.4 วงจร RL ขณะไม่มีแหล่งจ่ายกำลัง [2] .....	10
2.5 กระแสของวงจร RL [2].....	11
2.6 วงจร RC .....	13
2.7 วงจรในรูปที่ 2.6 หลังจากสับสวิตช์ กำหนดให้ $v_c(0) = V_0$ .....	13
2.8 กราฟผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC [7].....	14
2.9 ลักษณะแรงดัน $V_{su}(t)$ และกระแสของแหล่งจ่าย $I_{su}(t)$ [2].....	16
2.10 (ก) แหล่งจ่ายแรงดัน และ (ข) กราฟแรงดันของแหล่งจ่าย [2].....	16
2.11 วงจรเพื่อศึกษาผลตอบสนองที่สถานะศูนย์ของวงจรอันดับที่หนึ่ง RL [2] .....	17
2.12 วงจร RL ขณะมีแหล่งจ่ายกำลัง [2].....	17
2.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ [3].....	19
2.14 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเทียบกับเวลา $t$ [3].....	20
2.15 วงจรเพื่อศึกษาผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RC [3] .....	20
2.16 วงจรอันดับที่หนึ่ง RC ที่ถูกขับโดยแหล่งจ่ายกระแสแบบขั้น [3] .....	21
2.17 กราฟแสดงระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณอิมพัลส์ [5].....	23
2.18 ผลตอบสนองในระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณขั้นบันได [5] .....	24
2.19 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล [7].....	26
2.20 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LM317 [7] .....	27
2.21 คุณลักษณะแรงดันออกสำหรับตัวขยายแบบทรานซิสเตอร์ต่อแบบเบสร่วม [9] .....	29
2.22 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP [9] .....	29
3.1 วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ [11] .....	32
3.2 วงจรควบคุมกระแส [10] .....	33
3.3 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล [7].....	34
3.4 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลที่พัฒนาแล้ว [7] .....	36
3.5 การประกอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล .....	36
3.6 สัญญาณแรงดันออกของวงจรขณะเปิดแหล่งจ่ายฯ .....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R_3$ ขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ	38
3.8 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R_2$ ขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ	39
3.9 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ	40
3.10 สัญญาณแรงดันออกของวงจรขณะปิดแหล่งจ่ายฯ	40
3.11 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะปิดแหล่งจ่ายฯ	41
3.12 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R_3$ ขณะปิดแหล่งจ่ายฯ	42
4.1 สัญญาณแรงดันขณะเปิดแหล่งจ่ายฯ ในกรณีโหลดตัวต้านทาน	47
4.2 สัญญาณแรงดันขณะปิดแหล่งจ่ายฯ ในกรณีโหลดตัวต้านทาน	48
4.3 สัญญาณแรงดันขณะเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ ที่เป็น โหลด RL	50
4.4 สัญญาณแรงดันขณะปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ ในกรณี โหลด RL	51
4.5 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ	53
4.6 แรงดันมอเตอร์ขณะปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ	54
4.7 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดแหล่งจ่ายฯ เมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ $C_2 = 33 \mu\text{F}$	55
4.8 แรงดันมอเตอร์ขณะปิดแหล่งจ่ายฯ เมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ $C_2 = 470 \mu\text{F}$	56
4.9 แรงดันมอเตอร์ขณะเกิดกระแสไหลกลับ	57
4.10 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดแหล่งจ่ายฯ เมื่อเพิ่มขนาดตัวต้านทานเป็น $10 \text{ k}\Omega$	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ เราพบว่ามนุษย์มีความต้องการใช้ปริมาณ ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าในครัวเรือนที่เป็นสิ่งอำนวยความสะดวกสบาย เช่น พัดลม โทรทัศน์ ตู้เย็น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้เป็น อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัน คือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ และใช้ไฟฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับบางตัวสามารถรับกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการแปลงกระแส แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดจะต้องมีการแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา แหล่งจ่ายกำลังขึ้น เพื่อเป็นตัวช่วยแปลงแรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับ (AC) เป็นกระแสตรง (DC) เพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน

ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง เราพบว่า ในขณะที่แหล่งจ่ายกำลังจ่ายไฟให้แก่โหลดจะมีกระแสไฟฟ้าในขณะเริ่มเดินเครื่องสูง เนื่องจาก ในขณะเริ่มเดินเครื่อง กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังจะพุ่งขึ้นไปอยู่ที่กระแสที่โหลดต้องการทันที ส่งผลทำให้เกิดประกายไฟตรงบริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ทำให้เกิดความร้อน ผลของความ ร้อนอาจทำให้หน้าสัมผัสทองแดงไหม้หรือเกิดเสียงรบกวนตรงบริเวณรอยต่อ และมักเป็นสาเหตุ ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง การพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังเพื่อลดปัญหาไฟกระชากขณะเริ่ม เดินแหล่งจ่ายกำลังจึงเป็นการยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ แต่ราคาซื้อขายในท้องตลาด ก่อนข้างสูง ดังนั้นในโครงการนี้ จึงได้ศึกษาการทำงาน และสร้างตัวลดไฟกระชากขณะเปิดปิด แหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงกับโหลดเพื่อเป็นตัวปรับ แรงดัน และกระแสที่ออกจากแหล่งจ่ายให้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปจนถึงค่าที่โหลดต้องการ [1]

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อสร้างวงจรทางไฟฟ้าที่สามารถลดการกระชากของกระแสและแรงดันที่จ่ายให้โหลด ในช่วงการเปิดและปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

อุปกรณ์ช่วยลดการกระชากของกระแสไฟฟ้าในขณะที่เริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังที่สร้างในโครงการนี้สามารถลดการกระชากของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลัง และสามารถยืดอายุการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้

### 1.6 งบประมาณ

1) ค่าอุปกรณ์สร้างชิ้นงาน	1,000 บาท
2) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญาบัตร	1,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาทถ้วน)	<u>2,000 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

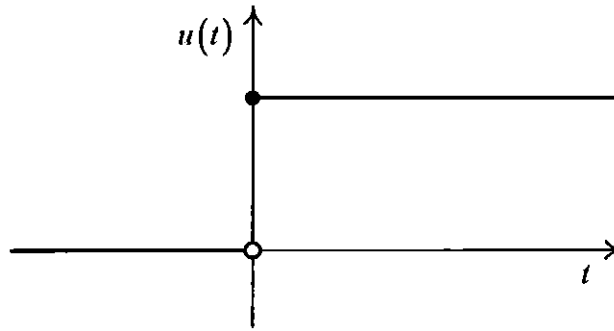
ในการแปลงแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงโดยทั่วไปพบว่า ขณะที่มีการเปิดแหล่งจ่ายกำลังจะมีกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ดังนั้นการสร้างอุปกรณ์ช่วยลดการกระชากของกระแสขณะเริ่มเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลังจะช่วยให้ชีวิตอายุการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้ใช้ได้ยาวนานขึ้น อุปกรณ์ช่วยลดการกระชากกระแสไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้นนี้ได้อาศัยหลักการทำงานในลักษณะค่อย ๆ เพิ่มกระแสให้แก่โหลดตั้งแต่ศูนย์ขึ้นไปจนถึงกระแสที่โหลดต้องการ โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรควบคุมกระแสที่ประยุกต์มาจากวงจรอันดับที่หนึ่ง (First-order circuits) และวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างวงจร การเกิดไฟกระชาก วงจรควบคุมกระแส และวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้รวมถึงวงจรอันดับที่หนึ่ง และช่วงผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) [1]

#### 2.1 ไฟกระชาก

สภาวะไฟกระชาก (Surge) เป็นสภาวะที่เกิดแรงดันสูงขึ้นในทันที ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดปกติของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือเกิดจากการเปิดปิดสวิตช์ของอุปกรณ์ ลักษณะตัวอย่างของแรงดันไฟกระชากสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.1 ที่มีการแบ่งลักษณะไฟกระชากตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 และรูปที่ 2.1 เป็นรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง [1]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของไฟกระชากตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

ชนิดของไฟกระชาก (Surge)	ระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (Rise time)	ช่วงระยะเวลาที่เกิด (Duration)
แบบนาโนวินาที (Nanosecond)	5 ns	< 50 ns
แบบไมโครวินาที (Microsecond)	1 $\mu$ s	50 ns – 1 ms
แบบมิลลิวินาที (Millisecond)	0.1 ms	> 1 ms



รูปที่ 2.1 รูปตัวอย่างของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง

การเกิดไฟกระชากในขณะที่มีการเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงให้แก่โหลดนั้น ทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้นในทันที ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายกำลังพุ่งขึ้นไปอยู่ในระดับที่โหลดต้องการทันทีเป็นเหตุให้เกิดประกายไฟที่บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ ทำให้เกิดความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นอาจทำให้หน้าสัมผัสของแดงหลุด หรืออาจทำให้เกิดเสียงรบกวนตรงบริเวณรอยต่อ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง ดังนั้นเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโหลด จึงได้มีการสร้างวงจรที่จะช่วยลดกระแสกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลัง โดยการใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มาสร้างเป็นอุปกรณ์ช่วยลดกระแสขณะเปิดของแหล่งจ่ายกำลัง (Soft starter) [1]

คุณสมบัติของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่โครงการนี้เลือกมาใช้สร้างวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล (Soft start dc power supply) คือวงจรอันดับที่หนึ่ง วงจรอันดับที่หนึ่งที่เป็นวงจรการทำงานที่ไม่มีการแกว่งของสัญญาณออกของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาอันดับที่สอง ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงเฉพาะวงจรอันดับที่หนึ่ง ได้แก่ วงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Circuits) และวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (RL Circuits) [2]



## 2.2 วงจรอันดับที่หนึ่ง

การวิเคราะห์วงจร RL และวงจร RC จะจำกัดเฉพาะกรณีตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้นไม่แปรค่าตามเวลาเท่านั้น เนื่องจากวงจรดังกล่าวประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุต่ออยู่เพียงหนึ่งตัว กระแสหรือแรงดันในวงจรจะถูกกำหนดโดยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First-order differential equations)

ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดสองขั้ว สามารถเก็บสะสมพลังงานจากวงจรไฟฟ้าได้ โดยตัวเหนี่ยวนำสามารถเก็บสะสมพลังงานได้ในรูปของสนามแม่เหล็ก และตัวเก็บประจุ จะเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า ในสภาวะที่เหมาะสมพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุนี้จะถูกปลดปล่อยคืนออกมาในรูปพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์อื่นในวงจร โดยไม่มีการสูญเสียกำลังในอุปกรณ์ทั้งสองนี้เลย [3]

### 2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานโดยอาศัยเส้นแรงแม่เหล็ก กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

$$v(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่  $v(t)$  คือแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่เวลา  $t$  มีหน่วยเป็นโวลต์

$\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์

สำหรับตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ไม่แปรค่าตามเวลา (Linear time-invariant inductors) ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ สามารถกำหนดได้ด้วยสมการ [2]

$$\phi(t) = Li(t)$$

โดยที่  $L$  คือสัญลักษณ์แทนความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามี่หน่วยเป็นเฮนรี

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของตัวเหนี่ยวนำเขียนได้ดังนี้

$$v(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

ฟังก์ชันของกระแสในรูปของแรงดันหาได้จากค่าปริพันธ์ดังต่อไปนี้

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v dt \quad (2.3)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าต่อเนื่องไม่สามารถเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่งโดยฉับพลันตรงเท่าที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีขนาดจำกัด นั่นคือ

$$i(t^-) = i(t) = i(t^+)$$

กรณีตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นที่แปรค่าตามเวลา (Linear time-varying inductors) ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เวลา  $t$  จะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi(t) = L(t)i(t) \quad (2.4)$$

กรณีของตัวเหนี่ยวนำไม่เชิงเส้น (Nonlinear inductors) ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอาจเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\phi(t) = f\{i(t), t\}$$

พลังงานแม่เหล็กที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned} w(t_0, t) &= \int_{i(t_0)}^{i(t)} L i dt \\ &= \frac{1}{2} L [i^2(t) - i^2(t_0)] \end{aligned}$$

ณ เวลาที่  $t_0 = 0$  พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำมีค่าดังสมการ (2.5)

$$e_M(t) = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (2.5)$$

โดยที่  $e_M(t)$  คือพลังงานแม่เหล็กที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ

### 2.2.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่รู้จักทั่วไปว่าสามารถเก็บประจุได้ ในวงจรไฟฟ้าส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งตัวเก็บประจุนี้ทำหน้าที่ในการเก็บและคายประจุไฟฟ้า เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเกิดการสะสมพลังงานขึ้นภายในตัวเก็บประจุ การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุ ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (2.6)$$

โดยที่  $i(t)$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่เวลา  $t$  มีหน่วยเป็นแอมแปร์  
 $q$  คือประจุไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์

สำหรับตัวเก็บประจุเชิงเส้นที่ไม่แปรค่าตามเวลา (Linear time-invariant capacitors) ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม

ตัวเก็บประจุสามารถกำหนดได้ด้วยสมการ

$$q(t) = C \cdot v(t) \quad (2.7)$$

โดยที่  $C$  คือสัญลักษณ์แทนความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด  
 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุจะเป็น

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} \quad (2.8)$$

ฟังก์ชันของแรงดันในรูปของกระแส หาได้จากค่าปริพันธ์ดังต่อไปนี้

$$v(t) = v(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (2.9)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าต่อเนื่อง ไม่สามารถเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่งโดยฉับพลันตรงเท่ากับที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีขนาดจำกัด นั่นคือกรณีตัวเก็บประจุเชิงเส้นที่แปรค่าตามเวลา (Linear time-varying capacitors) ค่าประจุไฟฟ้าที่เวลา  $t$  จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุกำหนดด้วยสมการ

$$q(t) = C(t)v(t) \quad (2.10)$$

กรณีตัวเก็บประจุไม่เชิงเส้น (Nonlinear capacitor) ความสัมพันธ์ของค่าประจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอาจเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันทั่วไปดังต่อไปนี้

$$q(t) = g\{v(t), t\}$$

พลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t v i dt \quad (2.11)$$

พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุ

$$w(t_0, t) = \int_{v(t_0)}^{v(t)} Cv dt \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_E(t) = \frac{1}{2} Cv^2(t) \quad (2.13)$$

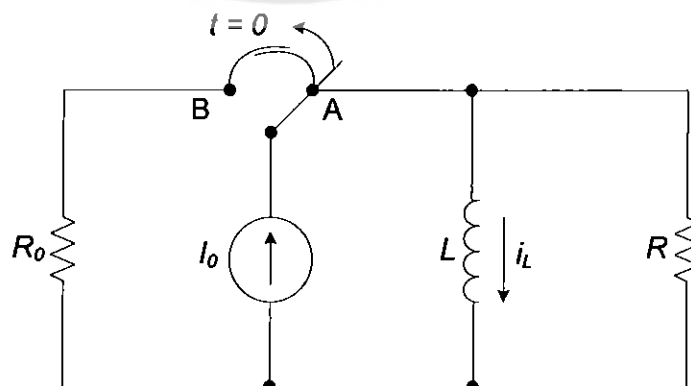
### 2.3 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RL และวงจร RC

ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ (Zero-Input Response) คือกระแสหรือแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของพลังงานที่สะสมอยู่ในวงจร โดยไม่มีการขับนำจากแหล่งจ่ายพลังงานอิสระ

ในกรณีที่วงจรเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เวลา  $t_0$  กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเป็นปริมาณต่อเนื่องที่เวลา  $t = t_0$  ส่วนแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะเป็นปริมาณที่ไม่ต่อเนื่อง [2]

#### 2.3.1 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RL

การวิเคราะห์ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RL เราพิจารณาวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสอิสระจ่ายกระแสค่าคงตัวเท่ากับ  $I_0$  แอมแปร์ และกำหนดให้สวิตช์ถูกโยกจากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B ณ เวลา  $t = 0$  สังเกตว่าสวิตช์ที่ใช้ในวงจรเป็นแบบต่อก่อนตัดกล่าวคือ สวิตช์จะแตะกับตำแหน่ง B ก่อนที่จะย้ายออกจากตำแหน่ง A ทั้งนี้เพื่อให้แหล่งจ่ายกระแสสามารถจ่ายกระแส  $I_0$  ได้อย่างต่อเนื่อง

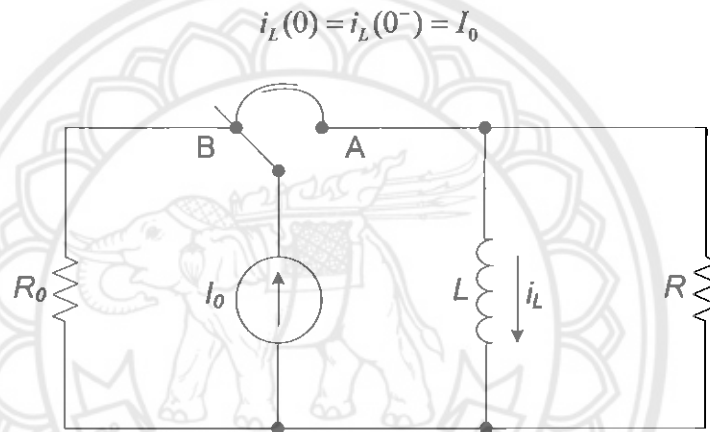


รูปที่ 2.2 วงจร RL สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองของสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ [2]

สมมติว่าสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง A ก่อนเวลา  $t = 0$  เป็นเวลานาน จนกระทั่งกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ณ เวลา  $t = 0^-$  มีค่าคงตัวโดยที่  $I_0$  ถูกกำหนดให้เป็นเวลาทันทีก่อนการโยกสวิตช์ มีผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ หรือตัวเหนี่ยวนำอยู่ในลักษณะลัดวงจรส่งผลให้มีกระแสทั้งหมดจากแหล่งจ่ายไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

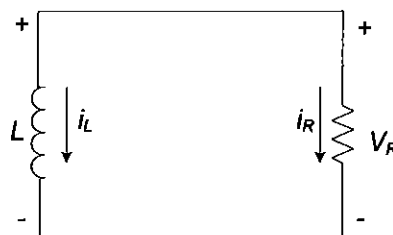
$$i_L(0^-) = I_0$$

เมื่อสวิตช์ถูกโยกออกจากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B ณ เวลา  $t = 0$  วงจรในรูปที่ 2.2 จะเปลี่ยนวงจรเป็นรูปวงจรรูปที่ 2.3 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแบบฉับพลันได้ กระแส  $i_L(0)$  ซึ่งเป็นกระแส ณ เวลาโยกสวิตช์ จึงมีค่าเท่ากับ  $i_L(0^-)$  ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลผ่านทันทีก่อนการโยกสวิตช์ นั่นคือ



รูปที่ 2.3 วงจร RL เมื่อ  $t \geq 0$

พิจารณา RL ขณะไม่มีแหล่งจ่ายกำลังซึ่งอยู่ทางด้านขวาของวงจรในรูปที่ 2.4 เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำไม่ได้ถูกขับนำโดยแหล่งจ่ายพลังงานอิสระ พลังงานที่เก็บอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสเริ่มต้น  $I_0$  ของตัวเหนี่ยวนำจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของกระแส  $i_L$  และจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเมื่อกระแส  $i_L$  ดังกล่าวไหลผ่านตัวต้านทาน R การที่พลังงานในรูปสนามแม่เหล็กที่ตัวเหนี่ยวนำสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนที่ตัวต้านทานนี้ มีผลทำให้กระแส  $i_L$  มีค่าค่อย ๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ในที่สุด [2]



รูปที่ 2.4 วงจร RL ขณะไม่มีแหล่งจ่ายกำลัง [2]

พิจารณารูปวงจรรด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับ (KVL)

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{di_L}{i_L} = -\frac{R}{L} dt$$

หาปริพันธ์ทั้งสองข้างของสมการข้างต้นเราจะได้

$$\int \frac{di_L}{i_L} = -\frac{R}{L} \int dt$$

$$\ln i_L = -\frac{R}{L} t + K$$

โดยที่ค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ของการหาปริพันธ์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเริ่มต้น  $i_L(0)$  อาศัยนิยามของลอการิทึมธรรมชาติที่ว่า  $e^{\ln y} = y$  เราสามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$i(t) = Ae^{\frac{R}{L} t}, t \geq 0 \quad (2.15)$$

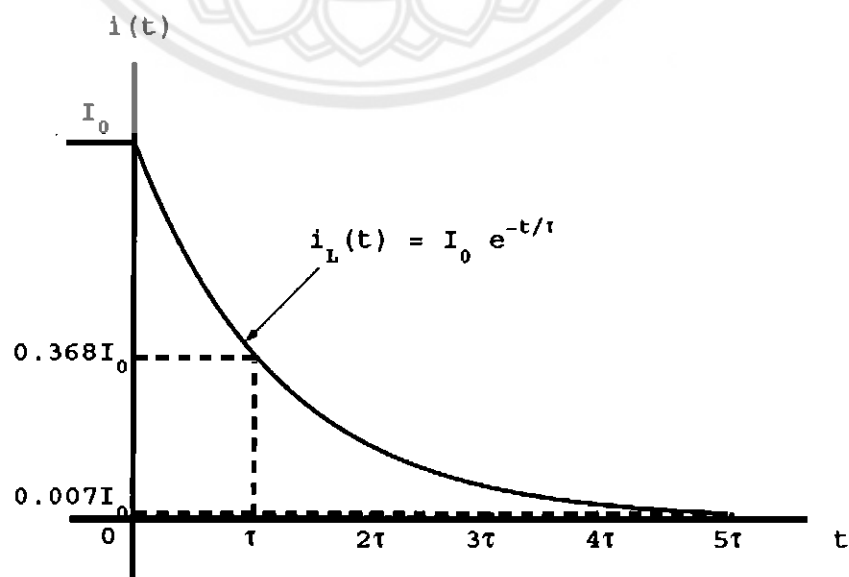
โดยที่  $A = ek$  จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่ว่า  $i_L(0) = I_0$  ดังนั้น ณ เวลา  $t=0$  เราได้

$$i_L(0) = I_0 = A$$

แทน  $A$  ดังกล่าวลงในสมการที่ (2.15) เราได้

$$i_L(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}, t \geq 0 \quad (2.16)$$

พิจารณาสมการที่ (2.16) ได้จากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระแสของวงจร RL [2]

สมการนี้หมายความว่ากระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าเริ่มต้นเป็น  $I_0$  และลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลัง (Exponential function) ไปสู่ศูนย์ด้วยอัตราที่กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์  $(R/L)$  เพื่อเน้นความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว เรานิยามส่วนกลับของสัมประสิทธิ์นี้ว่า ค่าคงตัวทางเวลา (Time constant) มีหน่วยเป็นวินาที สัญลักษณ์ คือ  $\tau$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.17)$$

รูปที่ 2.5 กราฟของกระแส  $i_L$  ในสมการที่ (2.16) สังเกตว่าเมื่อเวลาผ่านไป  $\tau$  กระแส  $i_L$  จะลดลงเหลือ  $e^{-1} = 0.368$  เท่าของค่าเริ่มต้น  $I_0$  และเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ  $5\tau$  กระแสจะลดลงเหลือ  $e^{-5} = 0.007$  เท่าของค่าเริ่มต้น  $i_0$  ซึ่งในทางปฏิบัติจะถือว่ามีค่าน้อยมาก และประมาณเป็นศูนย์ ข้อสังเกตดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระแส  $i_L$  มีค่าแปรตามเวลาเฉพาะในช่วง  $t < 5\tau$  ก่อนที่จะเข้าสู่ค่าศูนย์ เราเรียกกระแส  $i_L$  ในช่วงสั้น ๆ ว่า ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) สำหรับกระแส  $i_L$  ในช่วง  $t < 5\tau$  ซึ่งเป็นช่วงกระแส  $i_L$  เข้าสู่ศูนย์เราเรียกกระแส  $i_L$  ในช่วงนี้ว่า ผลตอบสนองในชั่งสถานะอยู่ตัว (Steady-state response) [2]

สมการคำนวณหาแรงดัน เราสามารถใช้ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} V_L(t) &= L \frac{di_L}{dt} \\ &= L \frac{d}{dt} (I_0 e^{-(R/L)t}) \\ &= -I_0 R \cdot e^{-(R/L)t}, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

สำหรับกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานที่เวลา  $t$  เราคำนวณได้จาก

$$p(t) = v_R(t) i_R(t) \quad (2.19)$$

เนื่องจาก  $V_R = V_L$  และ  $I_R = -I_L$  เราได้

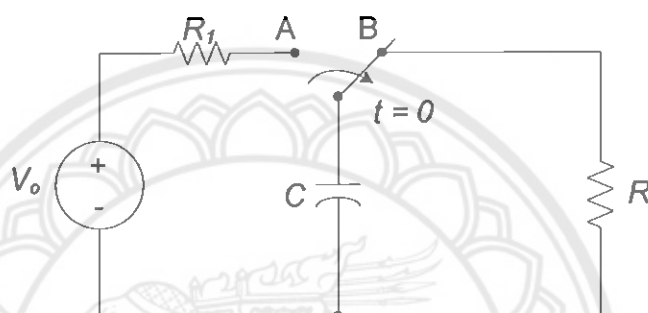
$$\begin{aligned} p(t) &= (-I_0 R \cdot e^{-(R/L)t}) (-I_0 e^{-(R/L)t}) \\ &= I_0^2 R \cdot e^{-2(R/L)t}, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

พลังงานที่จ่ายให้แก่ตัวต้านทาน

$$w(t) = \frac{1}{2} L I_0^2 (1 - e^{-2(R/L)t}), \quad t \geq 0 \quad (2.21)$$

### 2.3.2 ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC

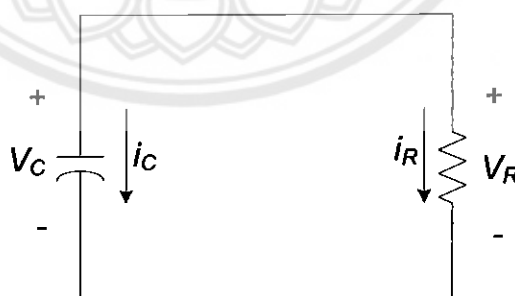
ในการหาผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC เราจะพิจารณาจากรูปที่ 2.6 กำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอิสระจ่ายแรงดันค่าคงตัวเท่ากับ  $V_0$  และสมมติให้สวิตช์อยู่ในตำแหน่ง A ก่อนเวลา  $t = 0$  เป็นเวลานานจนแรงดันและกระแสในวงจร ณ เวลา  $t = 0^-$  เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว นั่นคือกระแสของตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ผลดังกล่าวทำให้ตัวเก็บประจุปรากฏเสมือนเป็นวงจรเปิด แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงมีค่าเท่ากับแรงดันทั้งหมดของแหล่งจ่าย คือ  $V_0$  เมื่อสวิตช์ย้ายมาอยู่ที่ตำแหน่ง B ที่เวลา  $t = 0$  ตัวเก็บประจุยังคงมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ  $V_0$  อยู่เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะไม่เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดหลังจากการสับสวิตช์ดังกล่าว นั่นคือ [2]



รูปที่ 2.6 วงจร RC

$$v_C(0) = v_C(0^-) = V_0$$

นอกจากนี้ การตัดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากวงจรจะลดรูปวงจรในรูปที่ 2.6 เป็นวงจรใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรในรูปที่ 2.6 หลังจากสับสวิตช์ กำหนดให้  $v_C(0) = V_0$

พิจารณาวงจรในรูปที่ 2.7 ด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับกระแส (KCL) เราจะได้ความสัมพันธ์

$$i_C + i_R = 0 \quad (2.22)$$



เนื่องจาก  $i_c = C(dv_c/dt)$  และ  $i_R = V_R/R$  เมื่อแทนความสัมพันธ์ข้างต้นลงในสมการที่ (2.23) เราได้

$$C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_R}{R} = 0 \tag{2.23}$$

จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ เราได้ว่า  $V_R = V_c$  ดังนั้นสมการข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปร  $V_c$  ได้เป็น

$$C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} = 0, \quad t \geq 0 \tag{2.24}$$

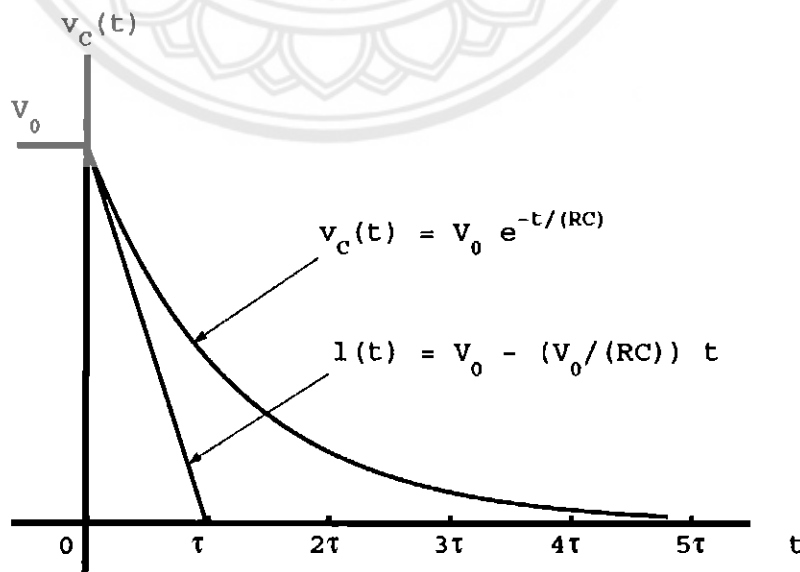
อาศัยขั้นตอนในการทำงานเดียวกันกับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของวงจร RL ตามสมการที่ (2.14) เราจะได้ผลเฉลยของสมการที่ (2.24) เท่ากับ

$$v_c(t) = Ae^{-t/(RC)}, \quad t \geq 0 \tag{2.25}$$

โดยที่  $A$  เป็นค่าคงตัวที่เป็นผลมาจากการหาค่าปริพันธ์ จากเงื่อนไขเริ่มต้น  $V_c(0) = V_0$  เราจะได้ผลเฉลยเป็น

$$v_c(t) = V_0 e^{-t/(RC)}, \quad t \geq 0 \tag{2.26}$$

สมการนี้แสดงว่า ผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC มีค่าลดลงแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง โดยมีค่าคงตัวเวลา  $\tau = RC$  ในรูปที่ 2.8 แสดงกราฟของแรงดันในสมการที่ (2.26) นอกจากนี้กราฟดังกล่าวยังแสดงเส้นตรงที่สัมผัสกับกราฟแรงดัน  $V_c$  ที่  $t = 0^+$  สังเกตว่าเส้นตรงดังกล่าวตัดแกนเวลาที่  $t = \tau$  [2]



รูปที่ 2.8 กราฟผลตอบสนองสัญญาณเข้าสู่ศูนย์ของวงจร RC [7]

จากค่า  $V_c$  เราสามารถหาค่า  $i_c$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_c(t) &= C \frac{dv_c}{dt} \\ &= C \frac{d}{dt} (V_0 e^{-t/(RC)}) \\ &= -\frac{V_0}{R} e^{-t/(RC)}, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

สำหรับกำลังงาน และพลังงานที่สูญเสียที่ตัวต้านทาน  $R$  เราได้ว่า

$$p(t) = \frac{V_0^2}{R} e^{-2t/(RC)}, \quad t > 0 \quad (2.28)$$

$$w(t) = \frac{1}{2} C V_0^2 (1 - e^{-2t/(RC)}), \quad t \geq 0 \quad (2.29)$$

เช่นเดียวกันกับกรณีวงจร RL พลังงานทั้งหมดที่ตัวต้านทานในวงจร จะได้รับจากตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ

$$w(\infty) = \frac{1}{2} C V_0^2$$

## 2.4 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RL และ RC

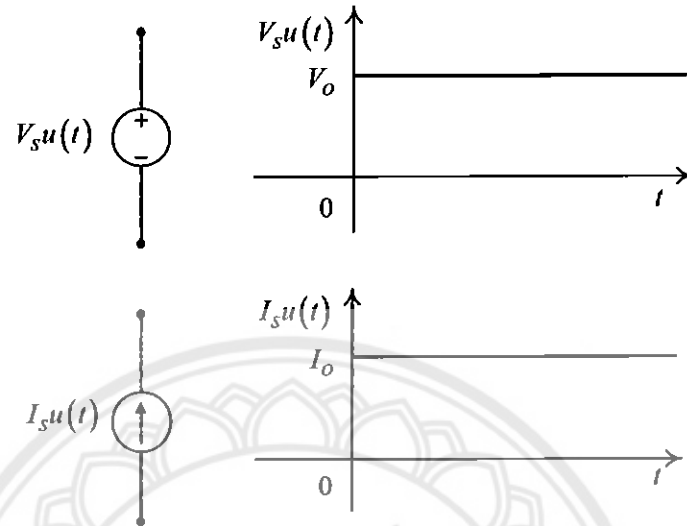
การวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในวงจรอันดับที่หนึ่ง RL และ RC ในกรณีที่วงจรถูกขับโดยแหล่งจ่ายพลังงานแบบทันทีทันใด โดยที่พลังงานที่สะสมในวงจร ณ เวลาทันทีก่อนการขับนำมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าของกระแสหรือแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะถูกขับโดยแหล่งจ่ายอิสระนี้เรียกว่า ผลตอบสนองสถานะศูนย์ ผลตอบสนองสถานะศูนย์ที่ศึกษาในหัวข้อนี้จะจำกัดเฉพาะกรณีที่แหล่งจ่ายพลังงานเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดันแบบขั้นเท่านั้น [4]

### 2.4.1 ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยของแหล่งจ่ายแบบขั้น

รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ และกราฟลักษณะสมบัติของแหล่งจ่ายแรงดัน และแหล่งจ่ายกระแสแบบขั้น สัญลักษณ์  $u(t)$  แทนฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (Unit step function) ซึ่งมีลักษณะสมบัติกำหนดโดยสมการ

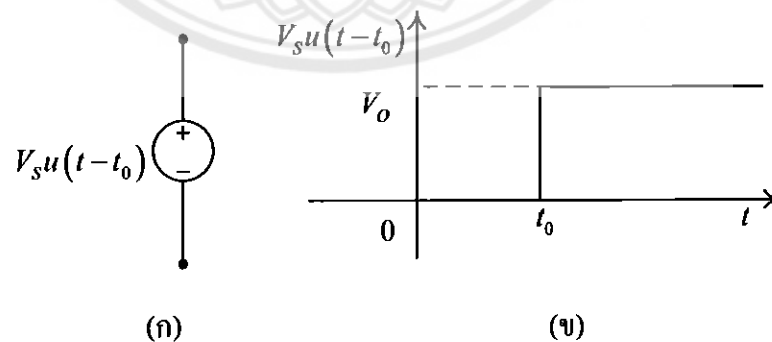
$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยดังกล่าวมีลักษณะเฉพาะสองประการ ประการแรก คือการบ่งชี้จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันเวลา  $t = 0$  และประการที่สอง คือการระบุขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันจากค่าศูนย์เป็นหนึ่งขั้น [4]



รูปที่ 2.9 ลักษณะแรงดัน  $V_s u(t)$  และกระแสของแหล่งจ่าย  $I_s u(t)$  [2]

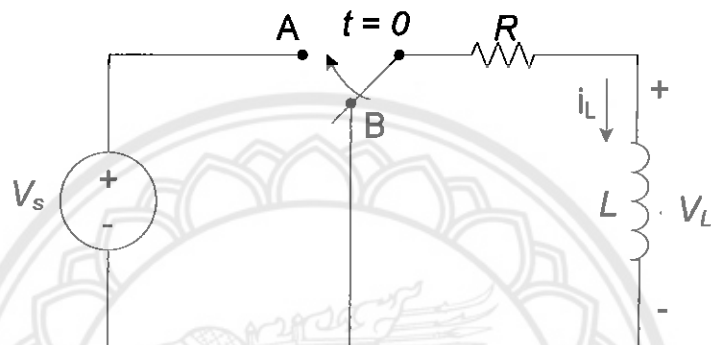
การคูณฟังก์ชันแบบขั้นด้วยค่าคงที่  $V_s$  และ  $I_s$  เป็นการกำหนดขนาดของฟังก์ชันแบบขั้นจากขนาดหนึ่งหน่วยไปเป็นโวลต์ และแอมแปร์ จากการแทนค่าตัวแปร  $t$  ด้วย  $t - t_0$  เป็นการกำหนดจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนค่าของฟังก์ชันแบบขั้นจากที่เวลา  $t = 0$  ไปเป็นที่เวลา  $t = t_0$  ดังนั้นแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_s u(t - t_0)$  เขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.10 (ก) และมีค่าแรงดันกำหนดดังกราฟในรูปที่ 2.10 (ข) [2]



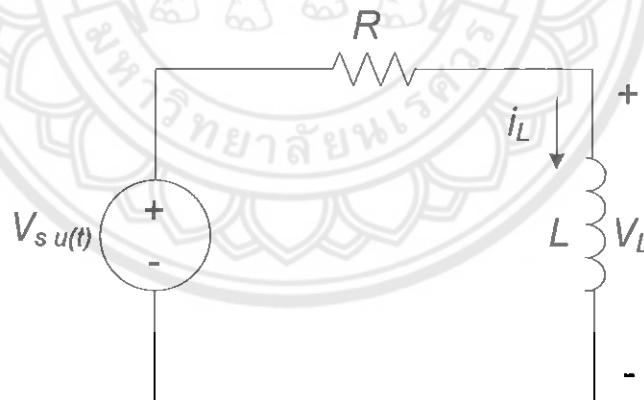
รูปที่ 2.10 (ก) แหล่งจ่ายแรงดัน และ (ข) กราฟแรงดันของแหล่งจ่าย [2]

### 2.4.2 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RL สำหรับสัญญาณเข้าแบบขั้น

ในการหาผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RL เราพิจารณาจากวงจรในรูปที่ 2.11 กำหนดให้สวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง B เป็นเวลานานก่อนที่จะถูกย้ายไปที่ตำแหน่ง A ณ เวลา  $t=0$  ดังนั้น สำหรับช่วงเวลา  $t$  น้อยกว่าศูนย์วงจร RL ดังกล่าวจะไม่ถูกขับนำจากแหล่งจ่ายอิสระใดเลย ส่วน ช่วงเวลา  $t$  มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์วงจร RL จะถูกขับนำโดยแหล่งจ่ายแรงดันค่าคงตัว  $V_s$  โดยอาศัย สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายแรงดันแบบขั้นตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.4.1 เราสามารถลดรูปวงจร RL ในรูปที่ 2.11 เป็นวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 วงจรเพื่อศึกษาผลตอบสนองที่สถานะศูนย์ของวงจรอันดับที่หนึ่ง RL [2]



รูปที่ 2.12 วงจร RL ขณะมีแหล่งจ่ายกำลัง [2]

พิจารณาด้วย KVL จะได้

$$Ri_L + L \frac{di_L}{dt} = V_s, t \geq 0 \quad (2.30)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$\frac{di_L}{dt} + \frac{R}{L}i_L = \frac{V_s}{L}$$

$$\frac{di_L}{i_L - V_s/R} = \frac{R}{L}dt$$

หาปริพันธ์ทั้งสองข้างของสมการจะได้ว่า

$$\int \frac{di_L}{i_L - V_s/R} = -\frac{R}{L} \int dt$$

$$\ln(i_L - V_s/R) = -\frac{R}{L}t + K$$

โดย  $K$  เป็นค่าคงที่ เรามีเงื่อนไขเริ่มต้นว่าที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ ) กระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นศูนย์ เขียนผลการหาปริพันธ์ในรูปฟังก์ชันเลขชี้กำลังได้เป็น

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} + Ae^{-(R/L)t}, \quad A = e^K \quad (2.31)$$

แทนค่ากระแสเริ่มต้น เพื่อหาค่า  $A$  จะได้ว่า  $i_L(0) = 0 = \frac{V_s}{R} + A$  นั่นคือ  $A = -\frac{V_s}{R}$

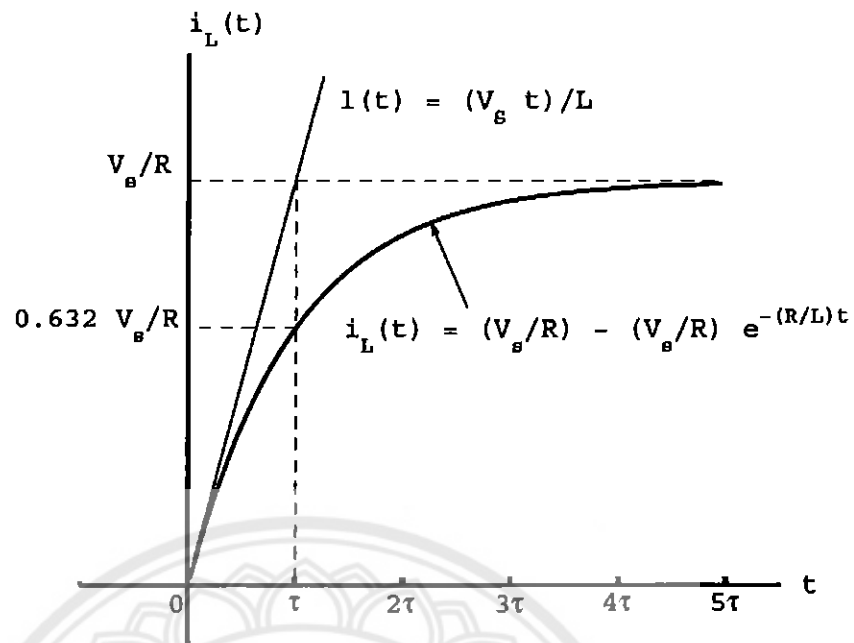
ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีรูปแบบเป็น

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} - \frac{V_s}{R}e^{-(R/L)t}$$

$$= \frac{V_s}{R}(1 - e^{-(R/L)t})$$

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-t/\tau}), \quad \tau = L/R \quad (2.32)$$

สามารถแสดงกราฟได้ในรูปที่ 2.13 แสดงกราฟของกระแส  $i_L$  ในสมการที่ (2.32) สังเกตว่าเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ  $\tau$  กระแส  $i_L$  จะเพิ่มขึ้นถึง  $e^{-1} = 0.632$  เท่าของค่าเริ่มต้น  $I_0$  และเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ  $5\tau$  กระแสจะเพิ่มจนมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น  $I_0$  (รูปที่ 2.13) [2]



รูปที่ 2.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ [3]

ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำหาได้จากความสัมพันธ์

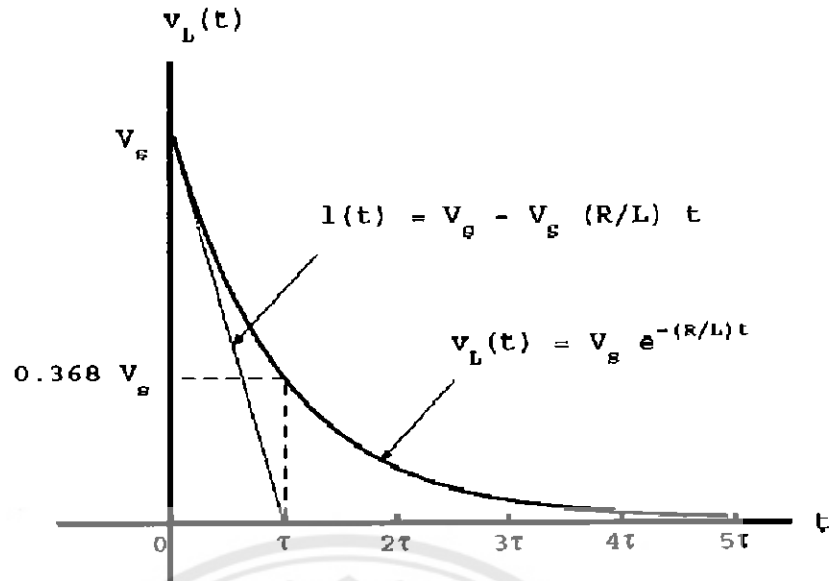
$$v_L = L(di_L/dt)$$

$$v_L(t) = L\left(-\frac{R}{L}t\right)\left(-\frac{V_g}{R}\right)e^{-(R/L)t}$$

$$= V_g e^{-(R/L)t}, t > 0$$

$$v_L(t) = V_g e^{-t/\tau}, \tau = L/R \quad (2.33)$$

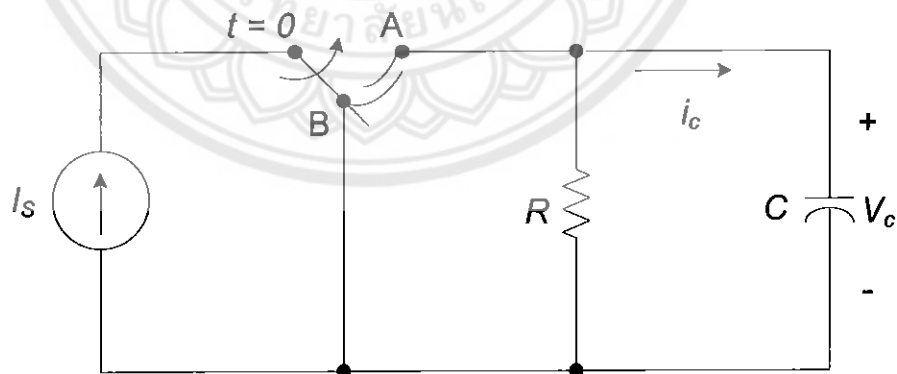
การที่เราไม่นิยามค่าแรงดัน  $v_L$  ที่  $t=0$  ทั้งนี้เนื่องจากแรงดัน  $v_L$  มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากค่าศูนย์ที่  $t=0^-$  ไปเป็นค่าคงตัว  $V_g$  ที่  $t=0^+$  รูปที่ 2.14 แสดงกราฟของผลตอบสนองสถานะศูนย์  $v_L$  ที่กำหนดในสมการที่ (2.33) กราฟดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ  $V_g$  ทันทีหลังปิดสวิตช์ และจะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้กราฟดังกล่าวยังแสดงกราฟเส้นตรงที่สัมผัสกราฟ  $v_L$  ที่เวลา  $t=0^+$



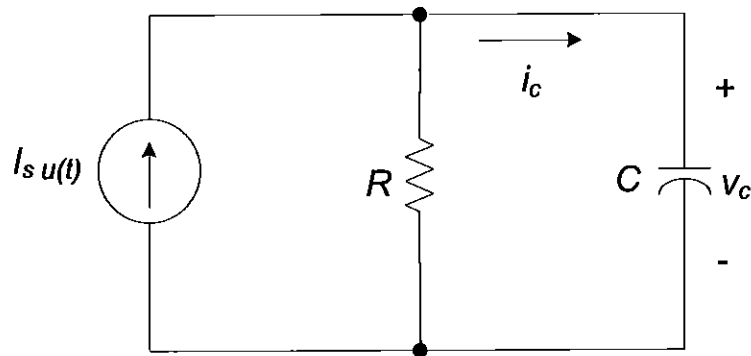
รูปที่ 2.14 กราฟแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเทียบกับเวลา  $t$  [3]

#### 2.4.3 ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RC สำหรับสัญญาณเข้าแบบขั้น

เป็นวงจรที่ใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจรอันดับที่หนึ่ง RC กำหนดวงจรในรูปที่ 2.15 ให้สวิตช์ที่ตำแหน่ง B เป็นเวลานานก่อนที่จะถูกย้ายไปตำแหน่ง A ณ เวลา  $t = 0$  โดยใช้สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายกระแสแบบขั้น เราสามารถลดรูปวงจร RC ดังกล่าวให้เป็นวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 วงจรเพื่อศึกษาผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RC [3]



รูปที่ 2.16 วงจรอันดับที่หนึ่ง RC ที่ถูกขับโดยแหล่งจ่ายกระแสแบบขั้น [3]

อาศัย KCL เราสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายวงจรขั้นต้นได้ดังนี้

$$C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} = I_s, \quad t \geq 0 \quad (2.34)$$

หารสมการที่ (2.34) ด้วย  $C$  จะได้ว่า

$$\frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{RC} = \frac{I_s}{C}, \quad t \geq 0 \quad (2.35)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (2.34) กับสมการที่ (2.35) จะพบว่าทั้งสองสมการมีรูปแบบที่เหมือนกันดังนั้น  $v_c$  ซึ่งเป็นผลเฉลยของสมการที่ (2.34) ย่อมมีรูปแบบเหมือนกับกระแสของตัวเหนี่ยวนำตามสมการที่ 2.31 โดยการแทนตัวแปร และสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 2.31 ด้วยค่าที่สอดคล้องกัน เราจะได้สมการของ  $v_c$  ที่ต้องการคือ

$$v_c(t) = I_s R + A e^{-t/(RC)} \quad (2.36)$$

เนื่องจากวงจร RC ในรูปที่ 2.16 ไม่ได้ถูกขับโดยแหล่งจ่ายพลังงานอิสระใด ๆ ในช่วงเวลา  $t < 0$  พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุที่เวลา  $t = 0^-$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $v_c(0^-) = 0$  โดยอาศัยหลักการที่ว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าต่อเนื่องเราจะได้ว่า

$$V_c(0) = V_c(0^-) = 0$$

โดยอาศัยเงื่อนไขข้างต้น เราสามารถหาค่า  $A$  ของสมการที่ (2.36) ได้เป็น  $A = -I_s R$  ดังนั้นผลตอบสนองสถานะศูนย์ของวงจร RC จะมีรูปแบบเป็น

$$v_c(t) = I_s R (1 - e^{-t/(RC)}), \quad t \geq 0 \quad (2.37)$$

สมการที่ (2.37) ชี้ให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ และลู่เข้าสู่ค่าสุดท้าย  $I_s R$  ด้วยค่าคงตัวเวลา  $\tau = RC$  สังเกตว่าเราสามารถนิยาม  $v_c$  ที่  $t = 0$  ได้ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความต่อเนื่องของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสำหรับค่า  $i_c$  ซึ่งเป็นกระแสของตัวเก็บ



ประจุในรูปที่ 2.13 เราสามารถหาได้จากแรงดัน  $v_c$  ของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยสมการที่ (2.37) โดยใช้ความสัมพันธ์  $i_c = C(dv_c/dt)$  นั่นคือ

$$i_c(t) = I_s e^{-t/(RC)}, \quad t > 0 \quad (2.38)$$

สมการที่ (2.38) ซึ่งให้เห็นว่า  $i_c(0^+)$  มีค่าเท่ากับ  $I_s$  ค่าดังกล่าวจะแตกต่างจาก  $i_c(0^-)$  ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เราจึงไม่สามารถนิยามค่ากระแสของตัวเก็บประจุที่เวลา  $t = 0$  ได้ [3]

## 2.5 ผลตอบสนองชั่วคราว

ช่วงเวลาสั้น ๆ ที่เกิดไฟกระชากในขณะที่มีการเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง เป็นช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สูงขึ้นในทันที คือช่วงที่เกิดผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response)

ผลตอบสนองชั่วคราว เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเวลาของระบบ การออกแบบควบคุมจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณป้อนเข้าเพื่อทดสอบคุณสมบัติของระบบ และผลตอบสนอง โดยป้อนสัญญาณที่รูปร่างแน่นอนเพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับระบบแล้วจึงพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบใน โดเมนเวลา (Time domain) เพื่อหาผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ ความผิดพลาดในช่วงสถานะอยู่ตัว (Steady-state error) และ เสถียรภาพของระบบ (Stability) [5]

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้ากับสัญญาณออกของระบบจะได้

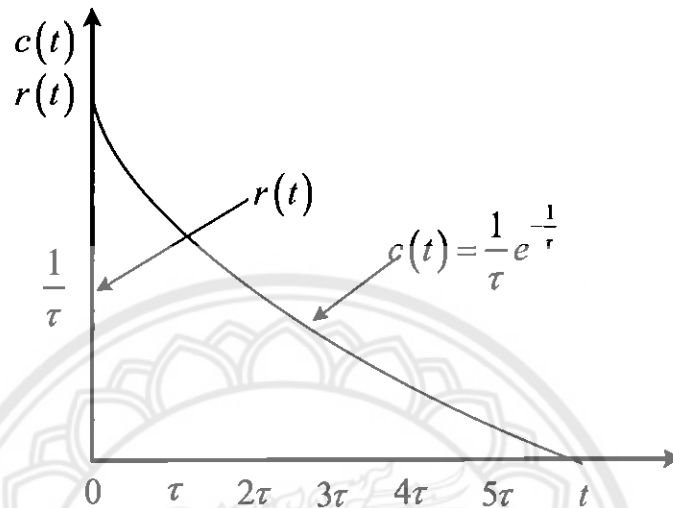
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2.39)$$

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบ จะใช้สัญญาณมาตรฐานทดสอบระบบ โดยจะใช้สัญญาณขั้นบันได (Unit-step) สัญญาณลาด (Unit-ramp) และสัญญาณอิมพัลส์ (Unit-impulse) เป็นสัญญาณเข้า และกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ [5]

### 2.5.1 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณอิมพัลส์

สำหรับสัญญาณอิมพัลส์ (Unit-impulse) แล้ว  $R(s) = 1$  ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$c(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad t \geq 0 \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณอิมพัลส์ [5]

### 2.5.2 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณขั้นบันได

สำหรับสัญญาณขั้นบันได (Unit-step) ซึ่ง  $R(s) = \frac{1}{s}$  ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$C(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.41)$$

ใช้การแยกเศษส่วนย่อย (Partial fraction) จะได้

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{(\tau s + 1)} \quad (2.42)$$

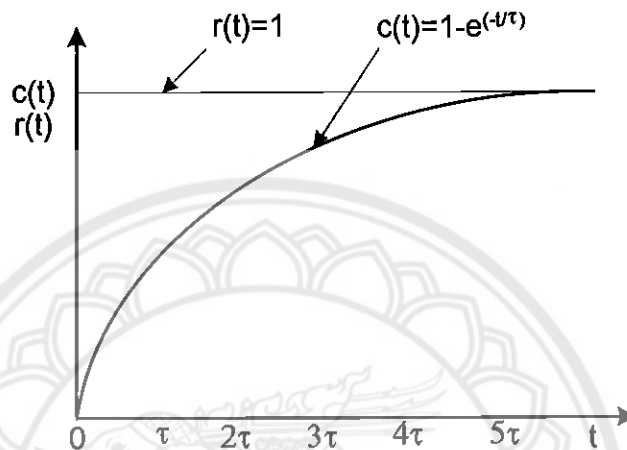
ทำการแปลงลาปลาซผกผันสมการข้างบน จะได้ว่า

$$C(s) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad t \geq 0 \quad (2.43)$$

จากสมการข้างบนมีความหมายว่า เมื่อ  $t = 0, c \rightarrow 0$  และ  $t = \infty, c \rightarrow 1$

โดยที่ช่วงสถานะชั่วครู่ข้างบนนี้มีลักษณะเป็นรูปโค้ง (Exponential curve) ดังรูปที่ 2.18 ดังนั้นเมื่อเวลา  $t = \tau$  ค่า  $C = 0.632$  ค่า  $\tau$  นี้คือค่าคงตัวทางเวลาของระบบ ถ้าหากว่าค่า  $\tau$  นี้มีค่าน้อย ระบบก็จะตอบสนองได้เร็ว คุณลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความชัน (Slope) ของเส้นสัมผัส (Tangent line) ที่  $t=0$  มีค่าเท่ากับ  $1/\tau$  นั่นคือ [5]

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{1 - e^{(-t/\tau)}}{\tau}$$



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองในระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณขั้นบันได [5]

สัญญาณออกจะเข้าหาค่าสุดท้ายที่  $t = \tau$  ถ้าหากว่ารักษาระดับความเร็วเริ่มต้นจากสมการ เราจะพบว่า ความชันช่วงสถานะชั่วครู่จะลดลงจาก  $t=0$  มาที่ 0 ที่  $t = \infty$  จากรูปข้างบนจะพบว่าใน  $1 \tau$  สัญญาณจะเคลื่อนจาก 0 ไปถึง 63.2% ของค่าที่กำหนด และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงเวลาเท่ากับ  $5 \tau$  สัญญาณถึงจะเคลื่อนถึง 99.3% ของค่าที่กำหนด ระบบจะถึงสถานะอยู่ตัว (Steady-state) เมื่อเวลาเท่ากับอนันต์ ในทางปฏิบัติก็ถือว่าในช่วง  $4 \tau$  ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองอยู่ในช่วง 2% ของค่าที่กำหนด

ข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของระบบอันดับที่หนึ่ง สำหรับสัญญาณเข้าแบบขั้นบันได คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{a}{s+a} \Rightarrow \frac{1}{\tau s+1} \quad (2.44)$$

ตัวคงทางตัวเวลา (Time constant)  $\frac{1}{a}$  หรือ  $\tau$  คือเวลาที่ค่า  $e^{-at}$  ลดลงมีค่าเท่ากับ 37% ของค่าเริ่มต้น หรืออีกนัยหนึ่ง คือเวลาที่ใช้สำหรับค่าผลการตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นบันไดมีค่าเท่ากับ 63% ของค่าสุดท้าย ส่วนกลับของตัวคงที่ของเวลามีหน่วยเป็น 1 ต่อวินาที หรือ ความถี่ ดังนั้นเราจึงเรียก ค่าตัว  $a$  นี้ว่าดัชนีความถี่ ทั้งนี้เพราะว่า ค่าอนุพันธ์ของพจน์  $e^{-at}$  จะมีค่าเท่ากับ  $-a$  เมื่อเวลา  $t=0$  ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)  $T_r$  คือช่วงเวลาที่ไ้ระหว่างค่าตอบสนองเพิ่มจาก 0.1 เป็น 0.9 ของค่าสุดท้าย ช่วงเวลาเข้าที่ (Setting time)  $T_s$  คือช่วงเวลาที่ค่าการตอบสนองเข้าอยู่ในช่วงของค่าสุดท้าย (Final value) [5]

### 2.5.3 ระบบอันดับที่หนึ่งซึ่งมีสัญญาณลาด

สำหรับสัญญาณลาด จาก

$$R(s) = \frac{1}{s^2} \quad (2.45)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$C(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (2.46)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันจะได้

$$c(t) = t - \tau(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.47)$$

สัญญาณค่าผิดพลาด  $e(t)$

$$\begin{aligned} e(t) &= r(t) - c(t) \\ &= t - [t - \tau(1 - e^{-t/\tau})] \\ &= \tau(1 - e^{-t/\tau}) \end{aligned}$$

เมื่อ  $t$  เข้าหา  $\infty$  หรือ  $e^{-t/\tau}$  เข้าหา 0 ดังนั้นค่าสัญญาณผิดพลาด  $e(t)$  จะเข้าหา  $\tau$  นั่นคือ  $e(t)_{t=\infty} = \tau$  ค่าผิดพลาดจะมีค่าเท่ากับ  $\tau$  เมื่อ  $t$  มีค่ามาก ๆ และยิ่งถ้าค่าคงตัวทางเวลาน้อยช่วงผิดพลาดของสถานะอยู่ตัวก็จะน้อยไปด้วย [5]

157 46942

ร/ส.

961840

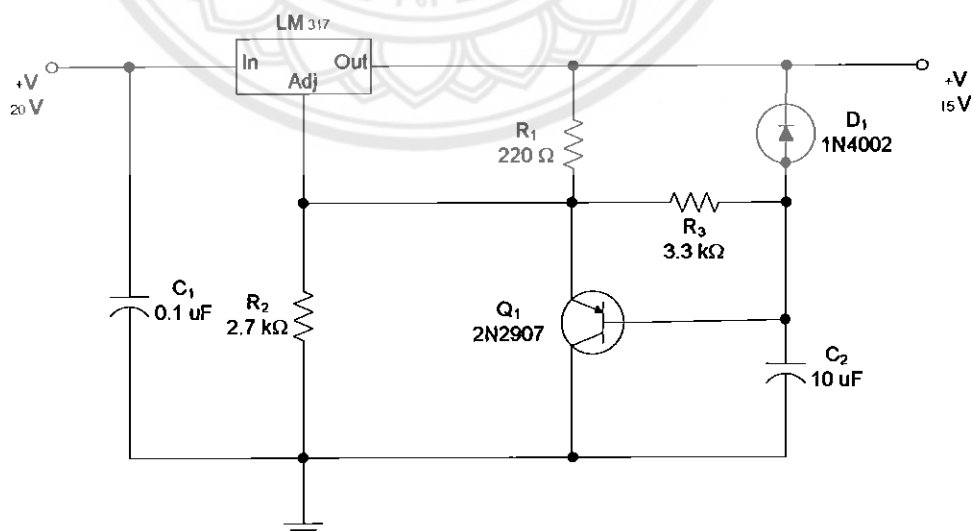
2553

## 2.6 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล ในปัจจุบันนิยมใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาผลิต อาทิ การใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ เพื่อป้องกันกระแสกระชากโดยอาศัยหลักการ เพิ่มความต้านทานในขณะที่เริ่มจ่ายไฟ ด้วยการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมให้กับวงจร เมื่อเกิดไฟกระชากขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันในวงจรลดลงตามกฎของโอห์ม อย่างไรก็ตามเมื่อความต้านทานเพิ่มขึ้นก็ทำให้เกิดความสูญเสียในรูปความร้อน นอกจากนี้เราอาจลดกระแสกระชากด้วยการใช้รีเลย์ตัดช่วงผลตอบสนองชั่วคราวออกแล้วค่อยปล่อยกระแสเข้าสู่โหลดหรือ การใช้คุณสมบัติของวงจรอันดับที่หนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยวงจร RL และวงจร RC ที่มีความสามารถในการสะสมพลังงานช่วยลดกระแสหรือแรงดันที่เกิดในขณะที่เปิดปิดของแหล่งจ่ายกำลัง และในโครงการนี้เราได้ใช้คุณสมบัติของวงจร RC ร่วมกับการทำงานของวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ (LM317) [6]

## 2.7 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลโดยใช้ไอซี LM317

วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล โดยใช้ไอซี LM317 ซึ่งเป็นไอซีคุมค่าแรงดันที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 1.25 V ขึ้นไป สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 1.25 V ถึง 37 V และเป็นวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังแบบนุ่มนวลโดยใช้หลักการของวงจรอันดับที่หนึ่ง ชนิดวงจร RC ดังรูปที่ 2.19 รวมทั้งไอซี LM317 จะมีระบบการป้องกันความร้อนเกินพิศักภายใน

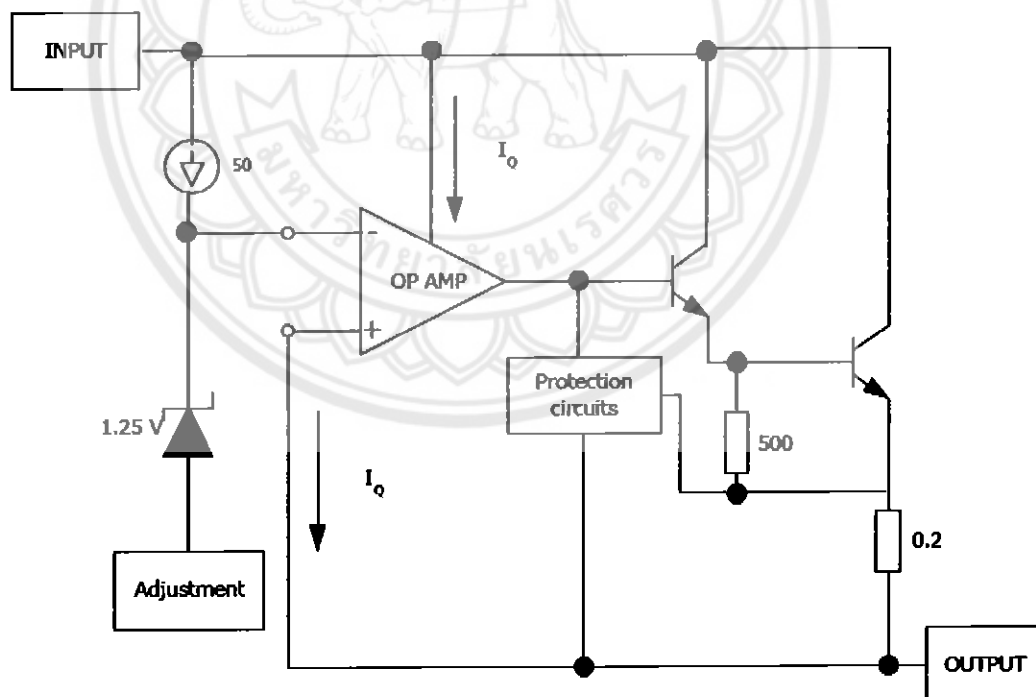


รูปที่ 2.19 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล [7]

สัญญาณที่ผ่านไอซี LM317 จะมีแรงดันคงที่ แต่ยังไม่สามารถจ่ายแรงดันแบบนุ่มนวลให้กับโหลดได้ จนกว่าจะผ่านวงจรควบคุมกระแสที่ใช้การทำงานร่วมกันระหว่าง ทรานซิสเตอร์ และตัวเก็บประจุ โดยจะใช้ทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907 ชนิด PNP ทำงานที่ความถี่สูง พลังงานต่ำ แรงดันต่ำ กระแสต่ำถึงปานกลาง และตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติ ความถี่ต่ำ กระแสไฟฟ้าสูง เมื่อสัญญาณไหลผ่านทรานซิสเตอร์ 2N2907 กระแสจะค่อย ๆ ไหลไปเก็บสะสมที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และในขณะเดียวกันแรงดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีแรงดันออกเพิ่มขึ้นตามตั้งแต่ศูนย์จนถึงแรงดันที่โหลดต้องการ [7]

### 2.7.1 ตัวคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ LM317

ภายในไอซีคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ จะประกอบด้วยแรงดันอ้างอิง (Reference voltage) วงจรเปรียบเทียบ (Comparator Circuit) อุปกรณ์ควบคุม (Control Device) และวงจรป้องกันโหลดเกิน (Overload) โครงสร้างภายในไอซีคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ LM317 แสดงในรูปที่ 2.20 โดยมีแรงดันอ้างอิง เท่ากับ 1.25 V และกระแสไหลผ่านขณะทำงาน 50  $\mu\text{A}$



รูปที่ 2.20 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LM317 [7]

ระบบป้องกันโหลดเกิน (Overload) ของไอซี LM317 เป็นระบบป้องกันอุณหภูมิ ซึ่งในสถานะปกติไอซีจะใช้งานที่อุณหภูมิเฉลี่ย 50 °C ในขณะที่ไอซี LM317 มีอุณหภูมิสูงเกิน 125 °C ตัวไอซีจะตัดกระแส โดยอาศัยหลักการลดการแพร่กระจายพลังงานที่ตัวทรานซิสเตอร์ลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความร้อนเมื่อลดการแพร่กระจายพลังงานลง อุณหภูมิจะลดลงจนถึงอุณหภูมิเฉลี่ย ทำให้ไอซีก็จะสามารถทำงานได้ตามปกติ [7]

### 2.7.2 ทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907

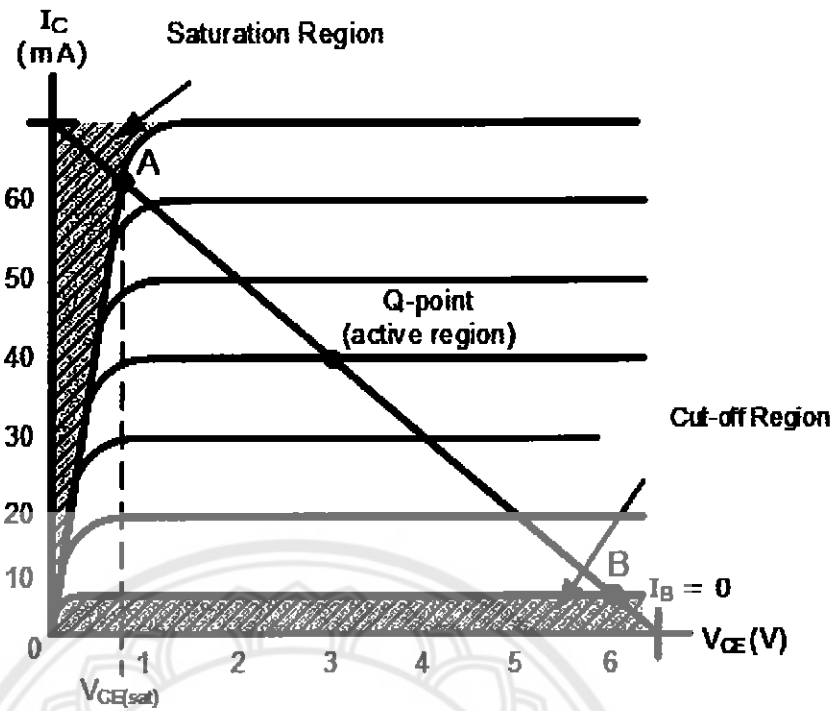
การทำงานของทรานซิสเตอร์แบ่งตามการทำงานออกเป็น 3 ย่าน ได้แก่ ย่านแอกทีฟ (Active Region) ย่านคัทออฟ (Cutoff Region) และย่านอิ่มตัว (Saturation Region)

ย่านแอกทีฟ (Active Region) เป็นย่านที่ถูกใช้สำหรับการขยายแบบเชิงเส้น (Linear Amplifiers) ในย่านแอกทีฟนี้ รอยต่อคอลเลคเตอร์กับเบส จะถูกไบแอสย้อน (Reverse Bias) ขณะที่รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์จะถูกไบแอสไปหน้า (Forward Bias) จากรูปที่ 2.21 กราฟจะชี้ให้เห็นว่าในย่านแอกทีฟ กระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  จะมีค่าเท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์  $I_C$  โดยประมาณ

$$I_E \cong I_C$$

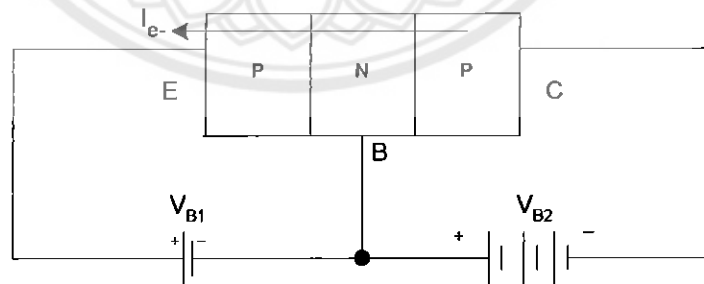
ย่านคัทออฟ (Cutoff Region) ในรูปที่ 2.21 ถูกนิยามให้เป็นย่านที่กระแสคอลเลคเตอร์  $I_C$  มีค่าเป็นศูนย์ โดยในย่านนี้รอยต่อคอลเลคเตอร์เบส และรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะถูกไบแอสย้อนทั้งคู่

ย่านอิ่มตัว (Saturation Region) ถูกนิยามว่าเป็นย่านที่อยู่ทางด้านซ้ายของแนว  $V_{CB}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ในย่านนี้รอยต่อคอลเลคเตอร์เบส และรอยต่อเบสอิมิตเตอร์จะถูกไบแอสไปหน้า [6]



รูปที่ 2.21 คุณลักษณะแรงดันออกสำหรับตัวขยายแบบทรานซิสเตอร์ต่อแบบเบสร่วม [6]

พิจารณารูปที่ 2.22 กระแสอิเล็กตรอนจะไหลในวงจร B ไป E สนามไฟฟ้าลบใน N จึงลดต่ำลงอิเล็กตรอนจากขา C จึงผ่าน B ไป E ผ่าน  $V_{B2} - V_{B1}$  ครบวงจร ลักษณะการทำงานในตัวขยายของทรานซิสเตอร์ PNP คล้ายกับหลอดหรือโวลต์ ทางขา E วิ่งผ่าน B ไปยังขา C รับเอาอิเล็กตรอนหรือไหลจาก  $V_{B1}$  จึงทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลครบวงจร



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP [6]



เมื่อให้เบสกับอิมิตเตอร์ได้รับการไบแอสไปหน้า (Forward bias) ทำให้มีกระแสไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส (ตามทิศทางหัวลูกศร) ซึ่งเราเรียกว่า กระแสเบส กระแสที่ไหลมีค่าประมาณ 2 - 5 % ของค่ากระแสทั้งหมด เนื่องจากที่ขาเบสนั้นสารที่เจือมีพื้นที่น้อยมากจึงทำให้ประจุจำนวนมากของโฮลมารออยู่ที่ขาเบส ถ้าให้ไบแอสระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ย้อนมาก ๆ จะทำให้มีกระแสไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ได้ กระแสที่ไหลจะมีค่าประมาณ 95- 98% ของกระแสทั้งหมดซึ่งสามารถสรุปได้ว่า [6]

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.48)$$

โดยที่  $I_E$  คือกระแสอิมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100%

$I_C$  คือกระแสคอลเลคเตอร์ มีค่าเท่ากับ 95 - 98%

$I_B$  คือกระแสเบส มีค่าเท่ากับ 2 - 5%



### บทที่ 3

## การสร้างวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

จากการศึกษาในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่าผลตอบสนองของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าต่อเนื่อง ไม่สามารถเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่งโดยฉับพลัน トラบเท่าที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีขนาดจำกัด ดังนั้นในการสร้างวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลโดยใช้เฉพาะคุณสมบัติการเก็บและคายพลังงานของตัวเก็บประจุเท่านั้น

### 3.1 การออกแบบวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

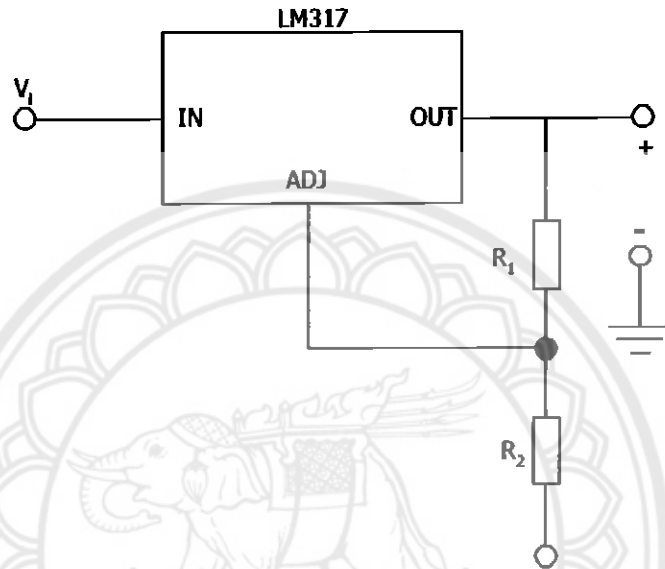
การออกแบบวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล ในโครงการนี้จะคำนึงถึงแรงดันออกของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง และแรงดันออกของวงจร เพราะวงจรนี้จะทำงานอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงกับโหลด

เนื่องจากแรงดันที่ออกมาจากแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง เกิดจากการแปลงแรงดันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงทำให้มีค่าแรงดันออกไม่คงที่ ดังนั้นการออกแบบวงจรนี้จึงมีการใช้ตัวคุมค่าแรงดัน (Regulator) เพื่อปรับค่าแรงดันกระแสตรงให้คงที่ และเพื่อจะจ่ายแรงดันกระแสตรงแบบนุ่มนวลให้กับโหลด จึงใช้การทำงานของวงจรอันดับที่หนึ่งชนิดวงจร RC ควบคุมกระแสโดยวงจรควบคุมกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP ควบคุมกระแสจ่ายให้แก่วงจร RC

ความสามารถของวงจรเริ่มต้นแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล ถูกออกแบบมาให้รับแรงดันกระแสตรงมากกว่าหรือเท่ากับ 3 V แต่ไม่เกิน 40 V มีแรงดันไฟฟ้าออกมากกว่า 1.5 V ขึ้นไป สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าออกได้ในช่วง 1.25 V ถึง 37 V และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 1.5 A โดยมีการแบ่งการทำงานภายในออกเป็น 2 วงจร ได้แก่ วงจรคุมค่าแรงดันแบบปรับค่าได้ โดยใช้ไอซี LM317 ซึ่งเป็นไอซีคุมค่าแรงดัน และวงจรควบคุมกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907 ชนิด PNP [10]

### 3.2 วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้

การเลือกใช้ไอซี เบอร์ LM317 ซึ่งเป็นไอซีคุมค่าแรงดันปรับค่าได้แบบ 3 ขา ในตัววงจร จะมีจุดที่เตรียมไว้สำหรับต่อตัวต้านทานภายนอกเพื่อปรับค่าแรงดันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งแรงดันออกประเภทนี้จะให้ไฟบวก โดยทำหน้าที่คุมค่าแรงดันออกของวงจรให้มีค่าคงที่ และสามารถเลือกปรับค่าระดับแรงดันออกได้ในช่วง 1.25 - 37 V และจ่ายกระแสสูงสุดได้ 1.5 A



รูปที่ 3.1 วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ [11]

การเลือกใช้ตัวต้านทานภายนอก  $R_1$  และ  $R_2$  ในรูปที่ 3.1 ของวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ โดยใช้คู่มือประกอบการใช้งาน LM317 ผู้ผลิตบอกว่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่าน  $R_1$  ควรอยู่ในค่าประมาณ 5 mA ดังนั้นค่าของ  $R_1$  คำนวณหาได้จาก

$$R_1 = \frac{1.25 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 250 \ \Omega$$

จากวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ที่เราศึกษา ปรับค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ให้มีค่า 2.7 k $\Omega$  ทำให้แรงดันออกมีค่า 15 V ซึ่งแรงดันออกคำนวณได้ ดังนี้

$$V_o = V_{Adj} + 1.25 \text{ V} \quad (3.1)$$

โดยที่  $V_{R1} = V_{ref} = 1.25 \text{ V}$  และ  $V_{R2} = V_{Adj}$

$$V_{R2} = R_2 \left( I_{adj} + \frac{1.25 \text{ V}}{R_1} \right) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_{ref} [1 + (R_2/R_1)] + (I_{adj})(R_2) \\
 &= 1.25 [1 + (2.7 \text{ k}/250)] + (50 \mu\text{A})(2.7 \text{ k}) \\
 &= 14.885 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

โดยที่  $V_{ref}$  คือแรงดันอ้างอิงภายในไอซี LM317

$I_{Adj}$  คือกระแสที่  $R_2$  ได้รับ (Adjustment current)

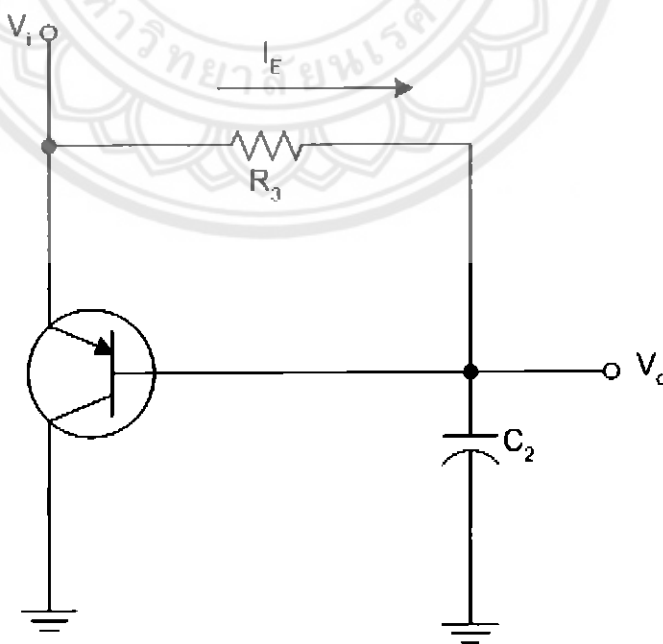
$V_{Adj}$  คือแรงดันที่ตกคร่อม  $R_2$  (Adjustment voltage)

จากการคำนวณแรงดันออกของวงจรคุมค่าแรงดัน ได้แรงดันออกเท่ากับ 14.885 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันออกที่ระบุไว้ข้างต้น [11]

### 3.3 วงจรควบคุมกระแส

การทำงานของทรานซิสเตอร์หมายเลข 2N2907 ชนิด PNP (รูปที่ 3.2) ในกรณีที่วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง และในกรณีที่หยุดเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง

ในกรณีที่วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง วงจรจะรับกระแสจากขาที่ Adj ของไอซี LM317 ที่มีกระแสในช่วง  $50 \mu\text{A} - 100 \mu\text{A}$  ผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  ไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  กระแสที่  $C_2$  ได้รับจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันแรงดันที่ได้ ก็จะเพิ่มขึ้นตามกระแส ทำให้แรงดันของออกของวงจรก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงแรงดันที่โหลดต้องการ

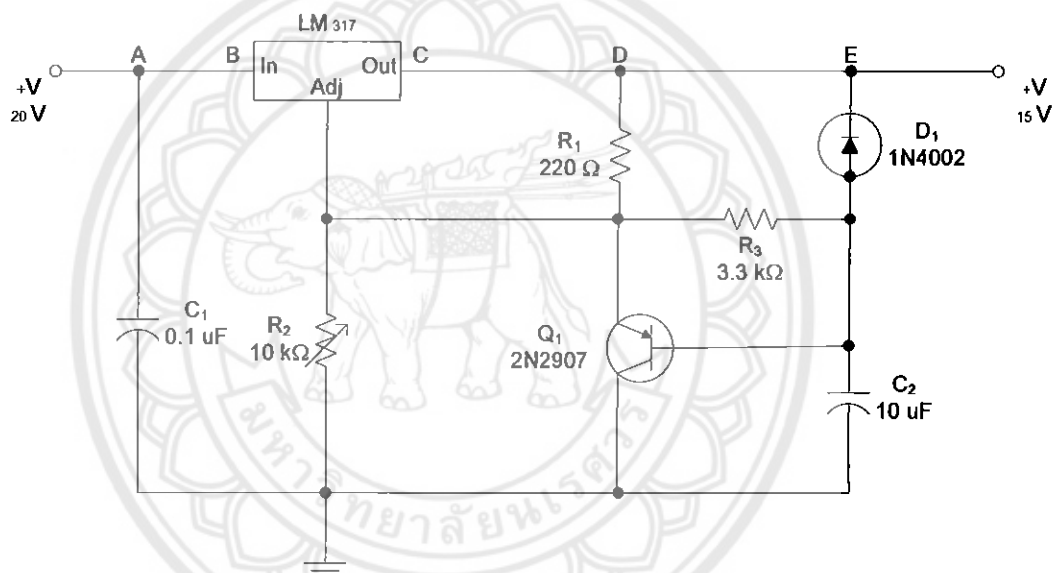


รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมกระแส [10]

ในกรณีที่วงจรหยุดเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงในขณะที่ไม่มีโหลด เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าต่อเนื่อง ไม่สามารถเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่ง โดยฉับพลันราบเท่าที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_2$  จึงทำให้เกิดการคายพลังงานของ  $C_2$  ไปยังตัวต้านทานภายในวงจร ส่งผลให้วงจรทำงานเป็นวงจรหยุดเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล [10]

### 3.4 การทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

เมื่อนำวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้และวงจรควบคุมกระแสมาทำงานร่วมกันจะกลายเป็นวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล [7]

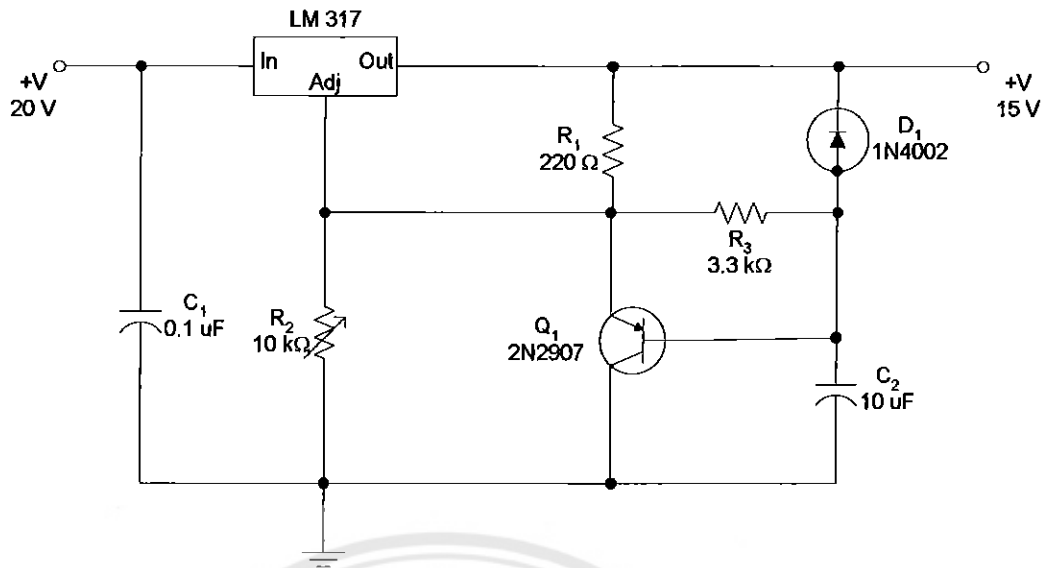
ในสถานะอยู่ตัวเมื่อทำการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อม  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_D$  และ  $V_E$  พบว่า แรงดันที่ตกคร่อม  $V_A$  เท่ากับ  $V_B$  ประมาณ 20 V และแรงดันที่ตกคร่อม  $V_C$ ,  $V_D$  และ  $V_E$  ประมาณ 16.4 V สังเกตแรงดันที่แตกต่างระหว่าง  $V_B$  และ  $V_C$  ที่ตกคร่อมไอซี LM317 มีค่าไม่เท่ากันเพราะว่า หน้าทีของไอซีรักษาระดับแรงดันปรับค่าได้ตัวนี้ จะเก็บสะสมพลังงานในตัวของมันเองให้คงที่ที่ 1.25 V โดยไม่ขึ้นอยู่กับการปรับระดับแรงดันด้านจ่ายกำลังให้แก่โหลด และเมื่อทำการปรับแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  ด้วยสมการที่ (3.3) โดยการปรับค่าความต้านทาน  $R_2$  จะได้แรงดันค่าหนึ่ง แรงดันค่านี้จะเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม  $V_{EC}$  ของตัวทรานซิสเตอร์ 2N2907

ในขณะที่เริ่มเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงพบว่า จะมีแรงดันตกคร่อมที่  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  และ  $V_D$  ทันที ยกเว้นที่  $V_E$  เพราะว่า หน้าที่ของทรานซิสเตอร์ 2N2907 และคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ เนื่องจากทรานซิสเตอร์เป็นชนิด PNP ดังนั้นมันจึงทำงานเมื่อมีแรงดัน  $V_{BE}$  เป็นการไบแอสไปหน้าและแรงดัน  $V_{BC}$  เป็นการไบแอสย้อนจากการทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯ ทางฝั่งของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ในขณะที่เริ่มเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงตัวเก็บประจุกระทำตัวเหมือนลัตวางจร คือ ไม่มีแรงดัน ทำให้แรงดันตกคร่อม  $R_3$  มีค่าประมาณ 0.7 V กระทำตัวเป็นแหล่งจ่าย  $V_{EE}$  แรงดันที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ของตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะกระทำตัวเป็น  $V_{CC}$  การลดลงของแรงดัน  $V_{EE}$  เป็นเสมือนการทำให้  $V_{BE}$  ไบแอสไปหน้าและการเพิ่มขึ้นของแรงดัน  $V_{CC}$  เป็นเสมือนการทำให้  $V_{BC}$  ไบแอสย้อน ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานในย่านกระตุ้น ซึ่งในขณะที่มันทำงาน จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวมันไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_2$  เก็บประจุเต็มแล้ว  $V_{CE}$  จะเปลี่ยนสถานะเป็น ไบแอสย้อน ทรานซิสเตอร์จึงหยุดการทำงาน

ปกติ เราไม่จำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  ยกเว้นกรณีที่วงจรของเราอยู่ห่างจากวงจรกรองมากกว่า 6 นิ้ว การต่อตัวเก็บประจุนี้จะช่วยทำให้ค่าผลตอบสนองชั่วคราวดีขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น ในกรณีวงจรทดลอง เนื่องจาก LM317 มีความถี่ของการทำงานสูง การต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำให้ เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และเป็นการกำหนดให้อ้างอิงถึงกราวด์ด้วย

### 3.5 การพัฒนางจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

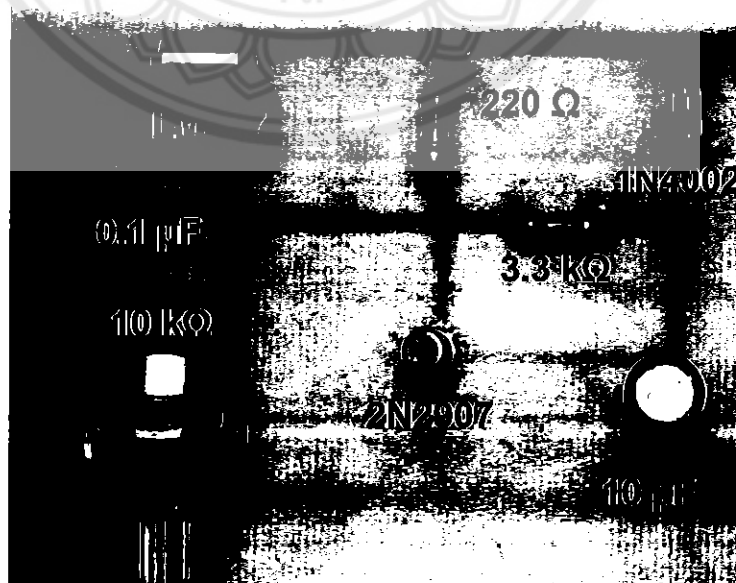
ในโครงการนี้เราได้มีการพัฒนางจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล โดยการเปลี่ยนตัวต้านทาน  $R_2$  จากตัวต้านทานคงที่มาเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายแรงดันให้แก่โหลด รูปวงจรที่ถูกพัฒนาแล้วแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลที่พัฒนาแล้ว [7]

### 3.6 การประกอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

ทำการออกแบบลายวงจร และเริ่มการประกอบวงจร โดยใช้แผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed circuit board: PCB) ทำการเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับแผ่นลายวงจรพิมพ์ เพื่อทำการทดสอบการทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง

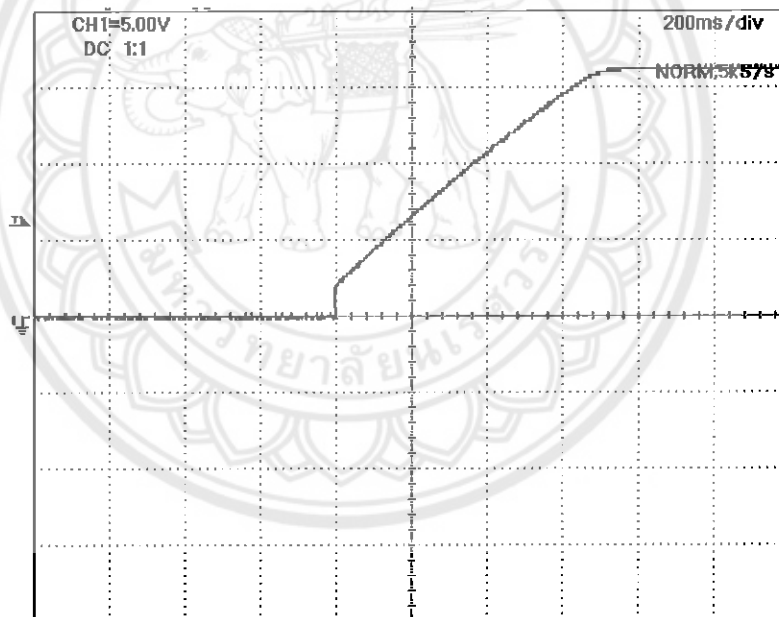


รูปที่ 3.5 การประกอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

### 3.7 การทดลองวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลที่สร้างขึ้นในโครงงานถูกนำมาทดสอบเพื่อพิจารณาระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว นั่นคือสัญญาณแรงดันออกของวงจรที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 20 V จากแหล่งจ่ายกำลังให้แก่วงจรที่มีการปรับค่า  $R_2$  (ดูรูปที่ 3.4) เพื่อให้วงจรจ่ายแรงดัน 16.4 V

ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของแรงดันของแหล่งจ่ายกำลังมีลักษณะเป็นเชิงเส้น สังเกตสัญญาณแรงดันออกของวงจรจะใช้เวลาประมาณ 700 ms ก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (ที่ 16.4 V) ดังรูปที่ 3.6 อย่างไรก็ตาม จากรูปจะเห็นการเพิ่มขึ้นของสัญญาณแรงดันออก ซึ่งพบว่าลักษณะการเพิ่มของสัญญาณแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นทันทีแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกแบบเชิงเส้นจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว และจากสัญญาณดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลที่เราศึกษาสามารถจ่ายแรงดันแบบนุ่มนวลให้กับโหลดได้



รูปที่ 3.6 สัญญาณแรงดันออกของวงจรขณะเปิดแหล่งจ่ายฯ

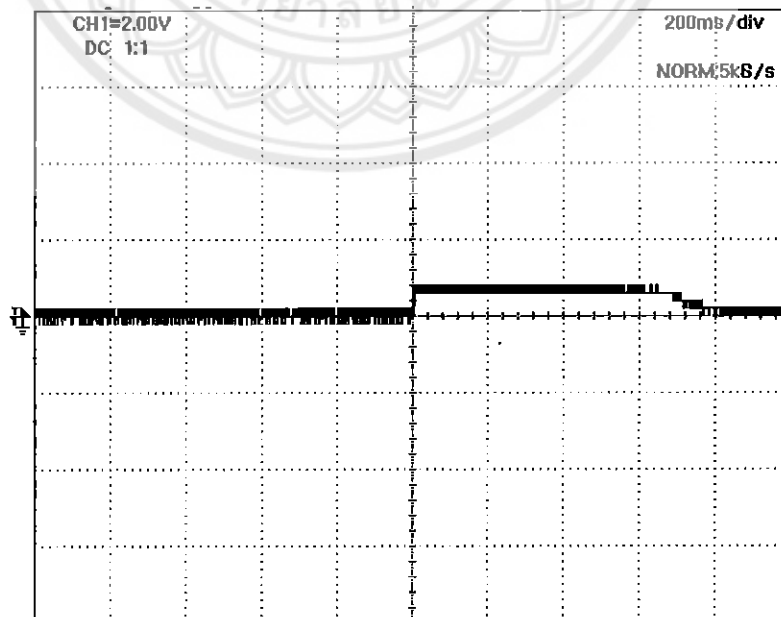
เนื่องจากวงจรที่เราศึกษาเป็นวงจร RC ระยะเวลาที่สัญญาณก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ  $5\tau$  แต่สาเหตุที่ค่าที่ได้จากการทดลองไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จาก



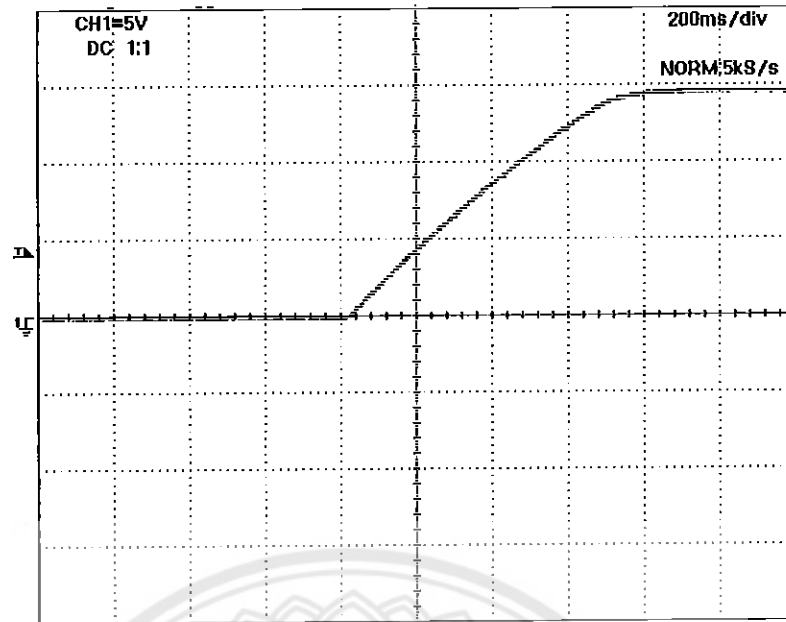
$$\begin{aligned}
 \tau &= RC \\
 &= (R_1 + R_3) C_2 \\
 &= (220\Omega + 3.3 \text{ k}\Omega) 10 \mu\text{F} \\
 &= 35.2 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

$$\therefore 5\tau = 176 \text{ ms}$$

สาเหตุของค่าเวลาที่ได้อาจการทดลองเมื่อเทียบกับการคำนวณไม่เท่ากันเพราะในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านแอกทีฟ กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  ซึ่งต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $R_3$  แล้วไหลเข้าตัวเก็บประจุ  $C_2$  และทำให้แรงดันของ  $C_2$  เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น อันเนื่องมาจากในขณะที่กระแสไหลออกจากตัวคุมค่าแรงดันลงที่ผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  กระแสมีการแยกไหลในสามเส้นทาง กล่าวคือ ในเส้นทางแรกกระแสค่าคงที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  เข้าสู่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  เป็นเวลาประมาณ 700 ms ก่อนจะลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลังจนมีค่าเป็นศูนย์ในเวลาประมาณ 100 ms ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งการลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลังนี้เกิดจากการที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน จึงมีแรงดันตกคร่อม  $V_{EC}$  ของทรานซิสเตอร์อยู่ ซึ่งเป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันให้แก่ตัวต้านทาน  $R_3$  จึงมีกระแสไหลผ่าน  $R_3$  ไปที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  แบบฟังก์ชันชี้กำลังตามหลักทฤษฎีของวงจร RC ส่วนในเส้นทางที่สองกระแสจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์เข้าไปที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  โดยผ่านขาเบสประมาณ 2% [6] ของกระแสทั้งหมดในขณะที่กระแสที่เหลือจะไหลลงกราวด์ และในเส้นทางสุดท้ายกระแสจะไหลเข้าสู่  $R_2$  โดยมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงกระแสสูงสุด ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์จะลดลงจากกระแสสูงสุดจนเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.9



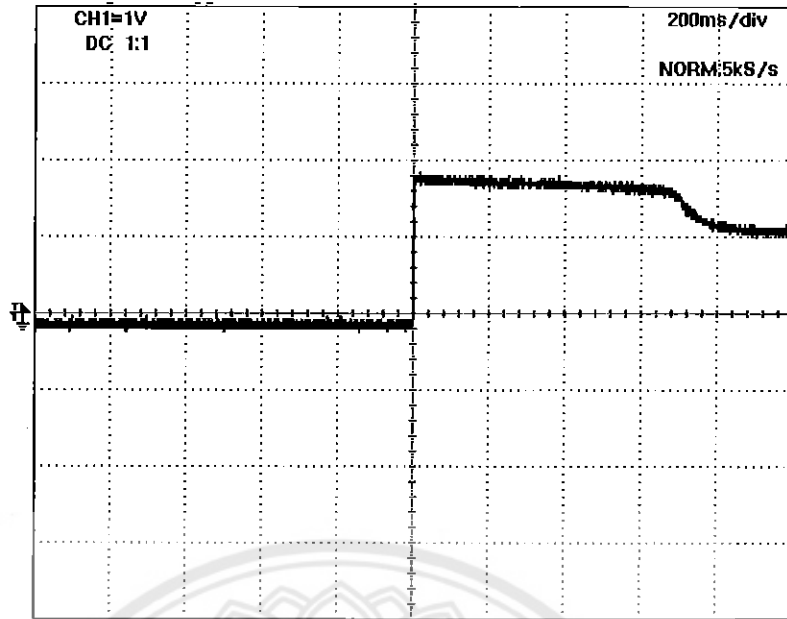
รูปที่ 3.7 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  ขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่าย



รูปที่ 3.8 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  ขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ

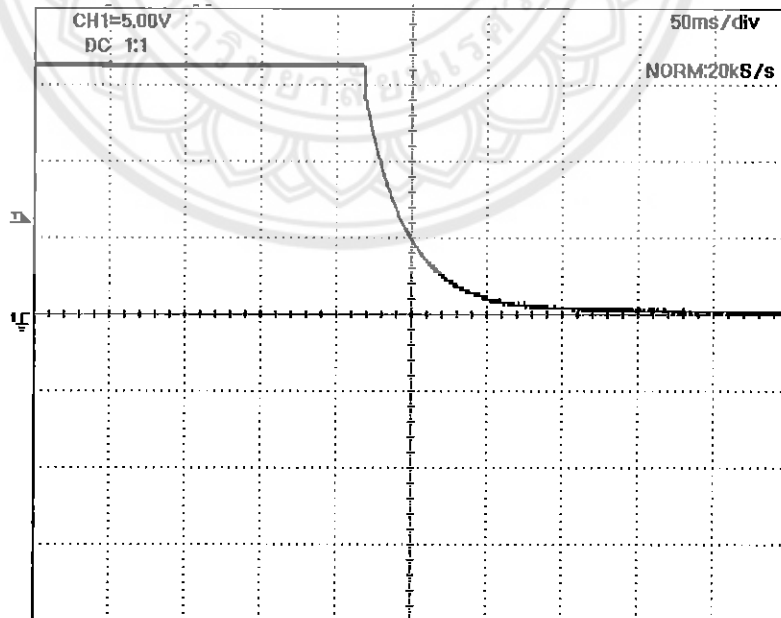
สังเกตรูปที่ 3.6 การกระชากของแรงดันในช่วงแรกเป็นผลมาจากแรงดันอ้างอิงของวงจรควบคุมแรงดันปรับค่าได้ LM317 และแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในย่านแอกทีฟ ในรูปที่ 3.9 เป็นรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯพบว่าแรงดันเริ่มต้นกระชากขึ้นมาอยู่ที่ 1.93 V ทันทีเป็นเวลา 700 ms แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงแบบฟังก์ชันซีกกำลัง จนเหลือแรงดันตกคร่อม 1.23 V เท่ากับแรงดันอ้างอิงของวงจรควบคุมแรงดันปรับค่าได้ LM317

แรงดันที่เพิ่มขึ้นของไดโอดเกิดจากการทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านแอกทีฟ การไบแอสไปหน้าของ  $V_{CE}$  และคุณสมบัติของตัวเก็บประจุขณะเริ่มเปิดแหล่งจ่ายฯที่กระทำตัวลัดวงจรทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่สถานะไบแอสคงที่ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  มีค่าประมาณ 0.7 V เป็นเวลาประมาณ 700 ms แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงแบบฟังก์ชันซีกกำลัง จากแรงดัน 0.7 V มาจนถึงศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  ขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง



รูปที่ 3.9 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มเปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายฯ

ในขณะที่สัญญาณของแรงดันออกของวงจรที่ได้หลังจากปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงจากการทดลองเดียวกันแสดงในรูปที่ 3.10 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณใช้เวลา 147 ms จึงเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (ลดลงจนเป็นศูนย์) ผลการทดสอบบ่งบอกว่าการทำงานของวงจรสามารถเป็นวงจรหยุดแบบนุ่มนวล (Soft stopper) ได้



รูปที่ 3.10 สัญญาณแรงดันออกของวงจรขณะปิดแหล่งจ่ายฯ

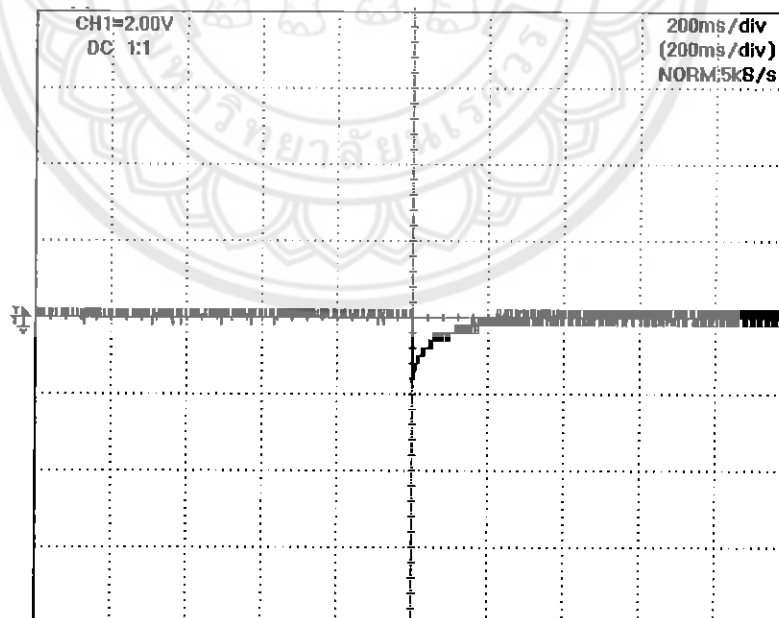
เมื่อปิดวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายที่เราศึกษา จะพบว่าตัวเก็บประจุ  $C_2$  คายพลังงานให้แก่ตัวต้านทาน  $R_2$  ที่ต่ออนุกรมกับ  $R_3$  ซึ่งขนานอยู่กับตัวต้านทาน  $R_1$  โดยผ่านไดโอด ซึ่งสามารถดูได้จากการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}\tau &= RC \\ &= [(R_1 // R_3) + R_2] C_2 \\ &= [(220\Omega // 3.3\text{ k}\Omega) + 2.7\text{ k}\Omega] 10\ \mu\text{F} \\ &= 29.06\text{ ms}\end{aligned}$$

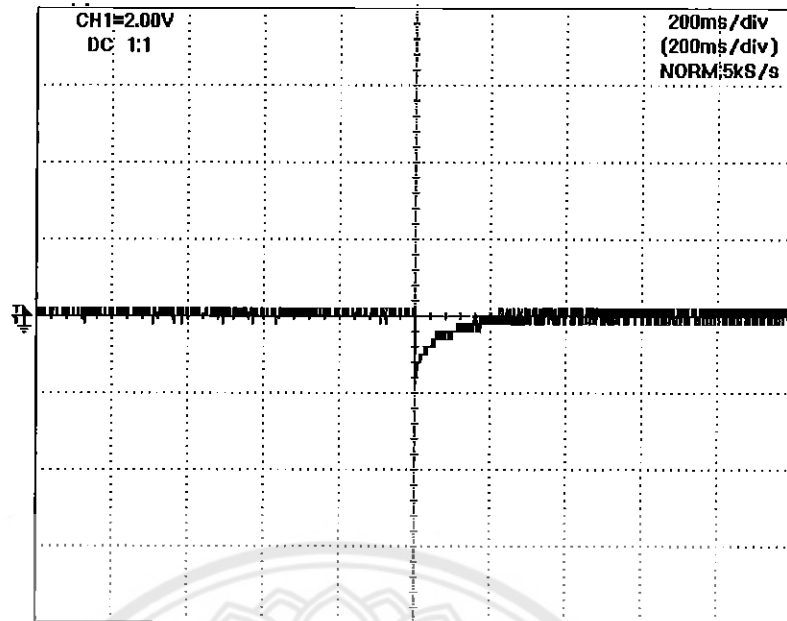
$$\therefore 5\tau = 145.3\text{ ms}$$

การคำนวณหาค่าคงตัวทางเวลาของวงจรได้ค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ 145.3 ms มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากรูปที่ 3.10 ซึ่งวัดได้ประมาณ 147 ms

ทิศทางการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  โดยวัดสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด และตัวต้านทาน  $R_3$  เพื่อทดสอบทิศทางการไหลของกระแสในขณะคายพลังงานของตัวเก็บประจุ  $C_2$  รวมถึงเปรียบเทียบกับการทำงานในขณะเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงด้วย ในรูปที่ 3.11 เป็นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะปิดแหล่งจ่ายฯ และในรูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  ขณะปิดแหล่งจ่ายฯ



รูปที่ 3.11 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะปิดแหล่งจ่ายฯ



รูปที่ 3.12 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R, ขณะปิดแหล่งจ่ายฯ



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

หลังจากการศึกษาการทำงานของวงจรอันดับที่หนึ่งชนิดวงจร RC วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ วงจรควบคุมกระแสในบทที่ 2 และการสร้างตัวช่วยลดการกระชากกระแสในขณะเริ่มเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงในบทที่ 3 ผู้ดำเนินโครงการได้ทำการทดสอบการทำงานของตัวลดไฟกระชากฯที่สร้างขึ้นโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การทดสอบตัวคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ของ LM317

ส่วนที่ 2 การทดสอบการทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯ

ส่วนที่ 3 การทดสอบการทำงานของวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯกับโหลดประเภทต่าง ๆ

#### 4.1 การทดสอบตัวคุมค่าแรงดันแบบปรับค่าได้ LM317

ในการทดสอบได้ออกแบบการนำเสนอเป็นตารางแสดงผลการทดลองโดยการวัดค่ากระแส และแรงดันเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยป้อนแรงดันเข้า 20 V และให้ตัวต้านทาน  $R_1$  มีค่าคงที่เท่ากับ 220  $\Omega$  ซึ่งตัวต้านทาน  $R_2$  มีไว้เพื่อตั้งค่าการไหลของกระแสภายนอกไอซี LM317 ในขณะที่ไม่มีโหลด ซึ่งในการทดสอบวงจรคุมค่าแรงดันแบบปรับค่าได้ LM317 มีแรงดันอ้างอิงภายใน 1.25 V ระหว่างตัวขาต้านออก (Output) และขาปรับค่า (Adjust)

การทดสอบแรงดันออกของวงจรเป็นไปตามกฎการแบ่งแรงดัน

$$V_o = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) พจน์ของ  $I_{ADJ} R_2$  สามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากกระแส  $I_{ADJ}$  มีค่าน้อยมาก (อยู่ในระดับ  $\mu A$ ) เมื่อแทนค่า  $I_{ADJ}$  ลงในสมการจึงไม่ส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณ

การทดสอบวัดค่ากระแสและแรงดันในตารางที่ 4.1 อธิบายได้ว่าการเพิ่มขนาดตัวต้านทาน  $R_2$  พบว่าค่าแรงดันที่วัดได้กับแรงดันที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเพิ่มค่าความต้านทานของ  $R_2$  มีผลทำให้แรงดันตกคร่อม  $R_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการการแบ่งแรงดัน จึงทำให้การเพิ่มของแรงดันออกแปรผันตรงกับค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของ  $R_2$  ยกเว้นกรณีที่ปรับค่าของตัวต้านทาน  $R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega$  มากพอที่จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเองสูงกว่าแรงดันเข้า ส่งผลให้แรงดันออกที่คำนวณได้จากตารางไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากข้อจำกัดของ LM317 ที่  $V_{out} - V_{in} = 3 \text{ V}$  ตามแผ่นข้อมูลการใช้ไอซี

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสออกและแรงดันออกของตัวคุมค่าแรงดันปรับค่าได้

ตัวต้านทาน $R_2$ ( $\text{k}\Omega$ )	แรงดันออก (V)		กระแสออก (mA)	
	จากการวัด	จากการคำนวณ	จากการวัด	จากการคำนวณ
1.7	11.23	10.90	5	5
2.7	16.42	16.60	5	5
3	18.12	18.30	5	5
3.3	18.71	20	5	5
4.7	18.79	27.95	4	5

#### 4.2 การทดสอบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวล

เนื่องจากวงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้สามารถปรับค่าแรงดันออกของวงจรตามที่ต้องการได้จริง เราจึงนำวงจรดังกล่าวมาทดสอบร่วมกับวงจรควบคุมกระแสกลายเป็นวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายที่เราศึกษาโดยแบ่งการทดสอบใช้งานออกเป็น 2 ส่วน นั่นคือส่วนที่หนึ่งเป็นการทดสอบการปรับแรงดันเข้าโดยกำหนดให้แรงดันออกคงที่ และส่วนที่สองเป็นการทดสอบการปรับแรงดันด้านออกโดยกำหนดให้แรงดันเข้าคงที่

#### 4.2.1 การปรับแรงดันเข้าโดยกำหนดให้แรงดันออกคงที่

การทดสอบปรับแรงดันเข้า โดยกำหนดให้แรงดันออกคงที่ เพื่อต้องการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงสถานะชั่วคราวในขณะที่เปิดปิดแหล่งจ่ายฯ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลการทดสอบโดยการกำหนดให้แรงดันออกคงที่ 16.4 V

ตารางที่ 4.2 ผลตอบสนองชั่วคราวเมื่อแรงดันออกคงที่

แรงดันเข้า (V)	ค่าคงตัวทางเวลา (ms)		แรงดันออก (V)
	ขณะเปิดแหล่งจ่าย	ขณะปิดแหล่งจ่าย	
15	500	147	13
20	700	147	16.4
22	700	147	16.4
25	700	147	16.4
30	700	147	16.4

จากการทดสอบปรับค่าแรงดันเข้าสามารถอธิบายได้ว่าแรงดันเข้าไม่มีผลกับค่าคงตัวทางเวลาทราบเท่าที่ยังอยู่ในข้อจำกัดของไอซี LM317 เช่น กรณีที่การทดสอบเป็นการกำหนดให้แรงดันออกของวงจรคงที่ 16.4 V การปรับค่าแรงดันเข้าที่ 15 V ซึ่งเป็นแรงดันที่น้อยกว่าแรงดันออกจึงส่งผลให้แรงดันออกที่ป้อนแรงดันเข้าเท่ากับ 15 V มีค่าเท่ากับ 13 V ตามข้อจำกัดของไอซี LM317

#### 4.2.2 การปรับแรงดันออกโดยกำหนดให้แรงดันเข้าคงที่

การทดสอบปรับแรงดันออก โดยกำหนดให้แรงดันเข้าคงที่ เพื่อต้องการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงสถานะชั่วคราวในขณะที่เปิดปิดแหล่งจ่ายฯ ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลการทดสอบโดยการกำหนดให้แรงดันเข้าคงที่ 20 V



ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองชั่วคราวเมื่อแรงดันเข้าคงที่ 20 V

แรงดันขาออก (V)	ค่าคงตัวทางเวลา (ms)		แรงดันออก (V)
	ขณะเปิดแหล่งจ่าย	ขณะปิดแหล่งจ่าย	
10	400	120	10
12	500	120	12
15	700	130	15
17	740	150	17
20	760	150	17

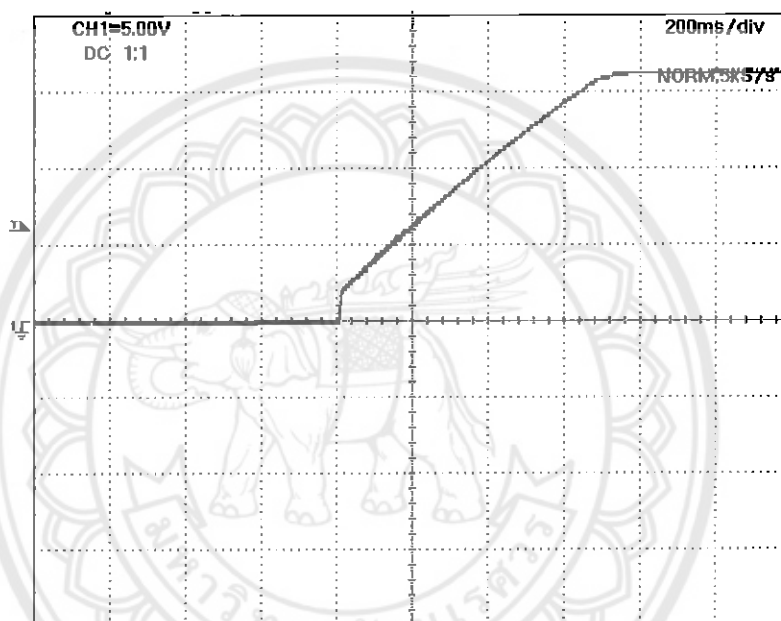
การเปลี่ยนแรงดันออกสามารถทำได้โดยการปรับขนาดความต้านทาน ขนาดของความต้านทานที่มากขึ้นหรือน้อยลงจะมีผลต่อแรงดันออก เนื่องจากกฎของการแบ่งแรงดัน และผลจากการปรับตัวต้านทานจะส่งผลต่อระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วย เพราะการเพิ่มขนาดของตัวต้านทานจะทำให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทานมากขึ้น ระยะเวลาขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังก็จะนานในทำนองเดียวกัน ถ้าเราปรับให้ค่าความต้านทานมากจนทำให้มีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  มากกว่า  $V_{cc}$  วงจรจะไม่สามารถจ่ายแรงดันที่เกินขนาดแรงดันเข้าได้ ตามข้อจำกัดของไอซี

### 4.3 การทดสอบจ่ายโหลดประเภทต่าง ๆ

#### 4.3.1 โหลดตัวต้านทาน

จากการทดสอบจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับ โหลดประเภทความต้านทานสามารถใช้ ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณแรงดัน ได้ดังรูปที่ 4.1 ในช่วงแรกพบว่าเกิดการกระชากของแรงดัน เป็นผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของ ไอซี LM317 ซึ่งจะมีแรงดันอ้างอิงตกคร่อมอยู่ขณะเปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง หลังจากนั้นกราฟจะเพิ่มขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 700 ms ก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (ที่ 16.4 V) ค่าคงตัวทางเวลาในการเก็บประจุสามารถคำนวณหาได้จากผลคูณของความต้านทานกับความจุไฟฟ้า  $\tau = RC$

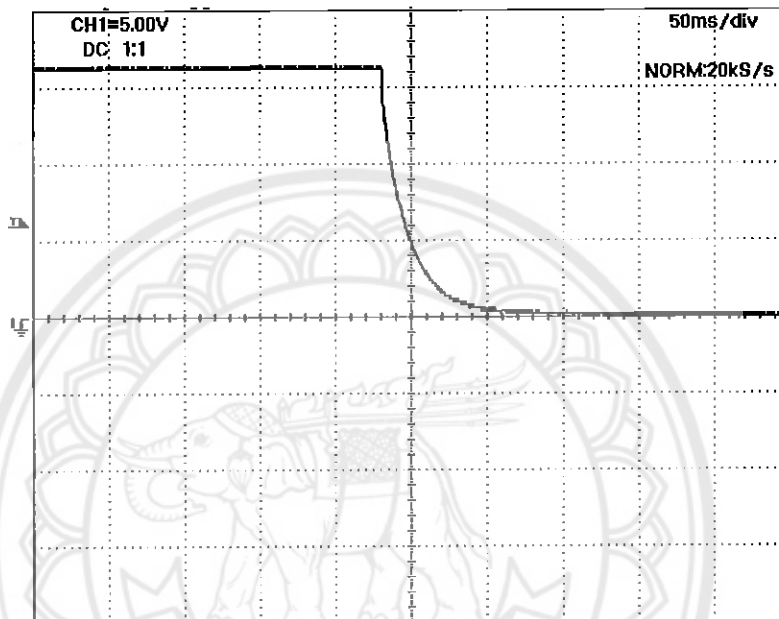
อย่างไรก็ตามกราฟที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีของค่าคงตัวทางเวลา เนื่องจากในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายฯจะเกิดแรงดันตกที่ตกคร่อมโหมลต์ตัวต้านทานและไดโอดพร้อมกันก่อนจะลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลังเมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน กระแสที่ไหลผ่านโหมลต์ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  และตัวต้านทาน  $R_1$  ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นพร้อม ๆ กัน ซึ่งในขณะเดียวกัน กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ในช่วงแอกทีฟก็จะค่อยลดลงแบบเชิงเส้นตามกระแสที่ไหลเข้าสู่ตัวต้านทาน  $R_3$  ด้วย เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงานกระแสจึงลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลังจนถึงสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงได้สัญญาณออกมาเป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัญญาณแรงดันขณะเปิดแหล่งจ่ายฯในกรณี โหมลต์ตัวต้านทาน

ในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงสามารถแสดงสัญญาณ ได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งรูปสัญญาณที่ได้ในช่วงแรกของกราฟขณะปิดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สัญญาณจะตกอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาผ่านไป จะเห็นว่าสัญญาณใช้เวลา 140 ms จึงเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (ลดลงจนเป็นศูนย์) เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของค่าคงตัวทางเวลาในการคายประจุ

การเพิ่มขนาดของความต้านทานของโหลดในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายฯ ไม่มีผลต่อเวลา  
 ในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง เพราะการเปลี่ยนขนาดของโหลดตัวต้านทาน ไม่มีผลต่อทิศทางของกระแส  
 ในขณะที่เก็บสะสมพลังงานของตัวเก็บประจุ แต่ในทางกลับกันการคายพลังงานของตัวเก็บประจุ  
 ในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายฯ จะมีการคายพลังงานผ่านวงจรและ โหลด จึงส่งผลให้โหลดที่มีค่าความ  
 ต้านทานมากใช้เวลาในการคายพลังงานนานขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันขณะปิดแหล่งจ่ายฯ ในกรณีโหลดตัวต้านทาน

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

การทำงาน	โหลด R = 1 kΩ		โหลด R = 4.7 kΩ		โหลด R = 10 kΩ	
	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ
เปิดแหล่งจ่าย	700	176	700	176	700	176
ปิดแหล่งจ่าย	135	143.54	140	144.87	150	145.10

สาเหตุของระยะเวลาที่อ่านได้จากการทดสอบในขณะที่เริ่มเปิดแหล่งจ่ายฯจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่อ่านได้จากการทดสอบในตารางที่ 4.4 เทียบกับระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวตามทฤษฎีวงจรอันดับที่หนึ่งมีค่าไม่เท่ากัน คือค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 700 ms ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าประมาณ 176 ms เนื่องจากอุปกรณ์ภายในวงจรต่อแบบขนานทำให้ในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายฯจะเกิดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ทุกตัวทันที ยกเว้นตัวเก็บประจุ  $C_2$  เพราะในช่วงนี้ทรานซิสเตอร์จะทำงานในสภาวะไบแอสคงที่ ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จึงทำตัวเสมือนว่าถูกลัดวงจร ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $V_{EB} = 0.7$  V คงที่ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  จึงเกิดกระแสค่าคงที่ไหลผ่าน  $R_3$  ซึ่งต่ออนุกรมกับ  $R_1$  (ที่ได้รับแรงดันตกคร่อมคงที่จากวงจรคุมค่าแรงดัน) ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_2$  หลังจากทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน แรงดันตกคร่อม  $R_3$  จะลดลงแบบฟังก์ชันชี้กำลังจนเป็นศูนย์ ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  มีค่าเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันชี้กำลังจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าระยะเวลาที่สัญญาณออกของวงจรใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวทางเวลาของวงจร RC เพียงอย่างเดียว

เนื่องจากวงจรทดสอบของเราเป็นการสร้างวงจรลดการกระชากกระแสไฟแบบนุ่มนวลที่ใช้หลักการของวงจรอันดับที่หนึ่ง ทำให้สามารถพิจารณาทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานเพื่อจะไปเก็บสะสมที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ได้ดังนี้ เมื่อกระแสไหลออกจากตัวคุมค่าแรงดัน กระแสจะผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  เข้าสู่วงจรควบคุมกระแสผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  แบบอนุกรมแล้วเก็บเข้าที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ดังนั้นการคำนวณจะพิจารณาที่ค่าห้าเท่าของค่าคงตัวทางเวลาดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\tau &= RC \\ 5\tau &= 5RC \\ 5\tau &= 5(R_1 + R_3)C_2\end{aligned}$$

พิจารณาขณะปิดแหล่งจ่ายฯพบว่าทิศทางของกระแสในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายฯไม่ได้ไหลไปในทิศทางเดียวกับกรณีเปิดแหล่งจ่ายฯ นั่นคือ  $C_2$  คายประจุผ่าน  $R_1$  และ  $R_3$  ที่ต่อขนานกัน และผ่าน  $R_2$  ที่ต่ออนุกรม ในกรณีที่มีการต่อโหลด ตัวเก็บประจุจะคายพลังงานให้แก่โหลดด้วย จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานของโหลดจะทำให้ระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเปลี่ยนแปลงไปด้วย นั่นคือ ยิ่งความต้านทานของโหลดมีค่าเพิ่ม ระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวจะยิ่งนานขึ้นดังแสดงให้เห็นในสมการต่อไปนี้

กรณีไม่มีโหลด

$$\begin{aligned}\tau &= RC \\ 5\tau &= 5RC \\ 5\tau &= 5C_2 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) + R_2 \right]\end{aligned}$$

กรณีต่อโหลด

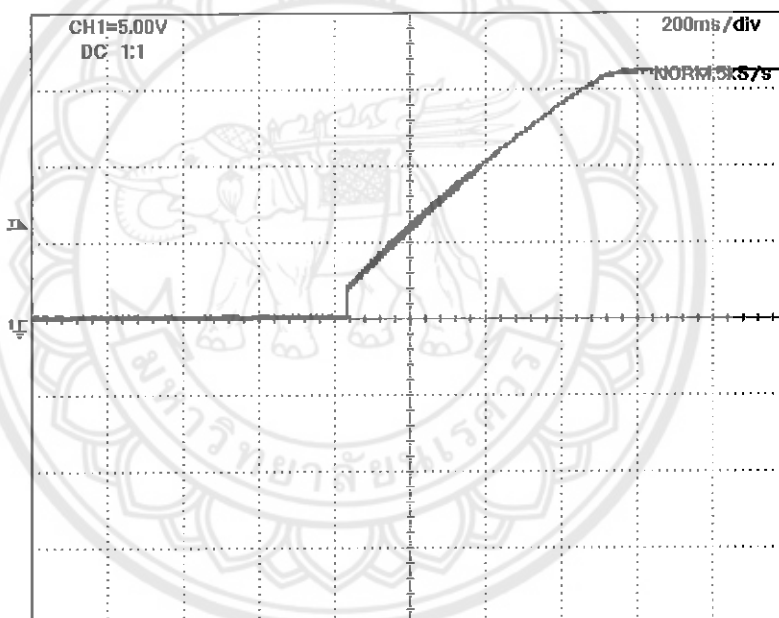
$$\tau = RC$$

$$5\tau = 5RC$$

$$5\tau = 5C_2 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) + R_2 + R_{Load} \right]$$

#### 4.3.2 โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ

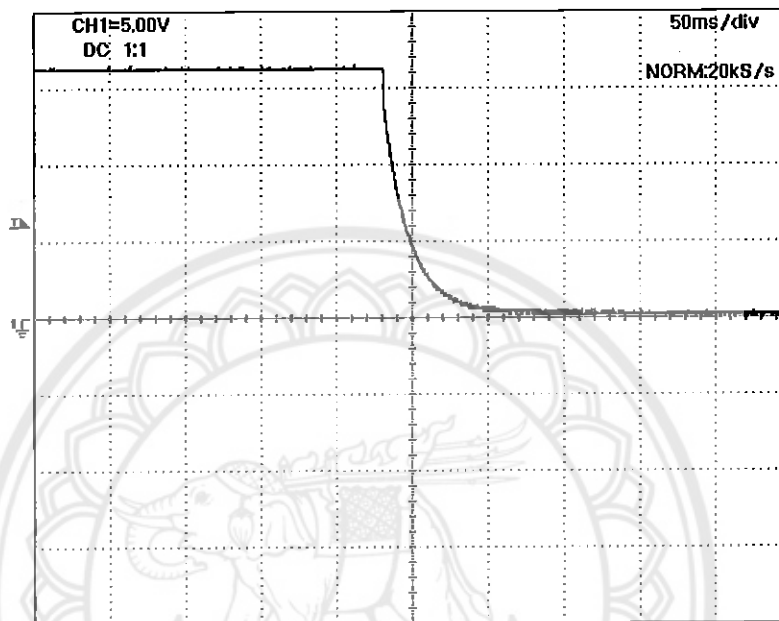
ในการจ่ายแรงดันกระแสตรงให้แก่โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ (RL) พบว่าลักษณะการเริ่มเดินของแหล่งจ่ายมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองจ่ายแรงดันให้แก่โหลดตัวต้านทาน (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันขณะเปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายที่เป็นโหลด RL

โดยลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า แรงดันเริ่มต้นช่วงแรกเป็นแรงดันอ้างอิงของ ไอซี LM317 ที่มีข้อดีคือช่วยในการจัดการเริ่มเดินเครื่องของโหลดประเภทมอเตอร์ ถ้าไม่มีแรงดันนี้มอเตอร์จะไม่สามารถเดินเครื่องได้ ในทางกลับกันโหลดที่เป็นประเภท R และ RL ไม่จำเป็นที่จะต้องมีความถี่เริ่มต้นช่วงแรก แต่การออกแบบวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายนี้ไว้เพื่อจ่ายแรงดันให้แก่โหลดได้หลาย ๆ ประเภท ดังนั้นการที่มีแรงกระชากเริ่มต้นก็ไม่ส่งผลเสียต่อโหลดที่เป็น R หรือ RL ดังนั้นวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลที่ศึกษานี้ สามารถจ่ายแรงดันกระแสตรงให้แก่โหลดประเภท R และ RL ได้

การทดสอบขณะปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง ที่ใช้วงจรทดสอบกับโหลดประเภท RL (รูปที่ 4.4) พบว่าเวลาขณะปิดแหล่งจ่ายฯของวงจรทดสอบจนเข้าสู่สถานะศูนย์โดยใช้โหลดประเภท RL มีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ โหลดประเภท R (ตารางที่ 4.5) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ยอมให้แรงดันตกคร่อมสามารถเปลี่ยนแปลงกลับพลันได้



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันขณะปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯในกรณี โหลด RL

ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงแบบกลับพลันในช่วงขณะเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯจะมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ จนถึงช่วงสถานะอยู่ตัวแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับขณะปิดแหล่งจ่ายฯ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงสถานะชั่วคราวทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเช่นกัน กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ถ้าตัวต้านทานมีค่ามากกว่ากระแสที่ไหลผ่านก็จะน้อย ผลของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อย แต่ถ้าตัวต้านทานมีค่าน้อยกระแสจะไหลผ่านมากผลของตัวเหนี่ยวนำก็จะมีมากอย่างไรก็ตามผลกระทบนี้จะทำให้สัญญาณขณะปิดแหล่งจ่ายฯเรียงขึ้นเท่านั้น (รูปที่ 4.2 เทียบกับรูปที่ 4.4)

เมื่อกำหนดการทดสอบโดยให้โหลดมีค่าเหนี่ยวนำคงที่ แต่เพิ่มขนาดของความต้านทานตามตารางที่ 4.6 พบว่าระยะเวลาในการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  เพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นที่ไม่มากนัก เนื่องจากในขณะปิดแหล่งจ่ายฯตัวเก็บประจุคายพลังงานให้แก่อุปกรณ์ภายในรวมถึงโหลดที่ต่ออนุกรมกับวงจรฯ

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กรณีโหลด RL ( $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ )

การทำงาน	โหลด $L = 90 \mu\text{H}$		โหลด $L = 0.28 \text{ mH}$		โหลด $L = 9 \text{ mH}$	
	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ
เปิดแหล่งจ่าย	700	176	700	176	700	176
ปิดแหล่งจ่าย	140	144.87	140	144.87	140	144.87

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว กรณีโหลด RL ( $L = 0.28 \text{ mH}$ )

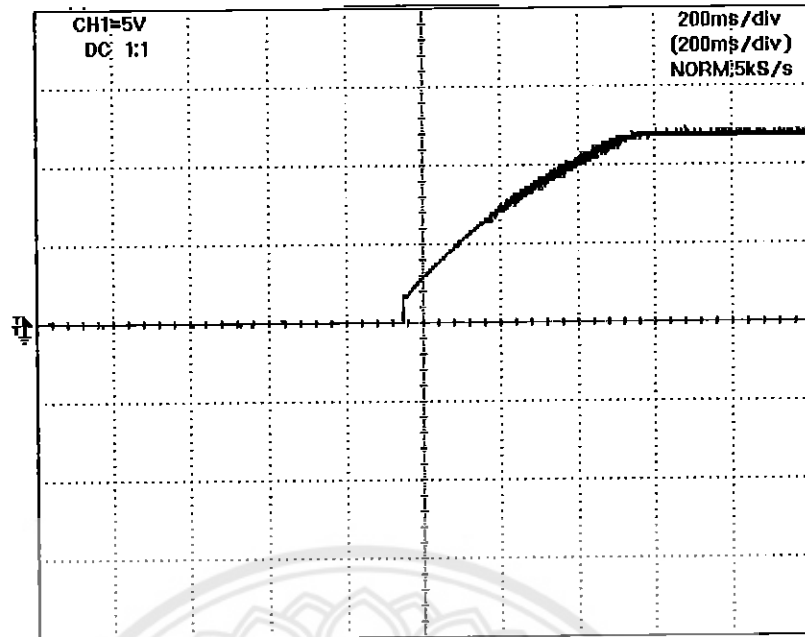
การทำงาน	โหลด $R = 1 \text{ k}\Omega$		โหลด $R = 4.7 \text{ k}\Omega$		โหลด $R = 10 \text{ k}\Omega$	
	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ	การทดสอบ	การคำนวณ
เปิดแหล่งจ่าย	700	176	700	176	700	176
ปิดแหล่งจ่าย	135	143.54	140	144.87	150	145.10

ในกรณีเปิดแหล่งจ่ายฯ ระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของโหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าประมาณ 700 ms เช่นกันกับกรณีโหลดตัวต้านทาน เนื่องจากการเกิดสัญญาณแรงดันเริ่มเดินเครื่องตกร่วมโหลด RL จะเหมือนกับการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันให้แก่โหลดตัวต้านทานเพราะทิศการไหลของกระแสในขณะเปิดแหล่งจ่ายฯจะไปในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นการเปลี่ยนชนิดของโหลดจึงไม่มีผลต่อแรงดันออกในขณะเริ่มเดินเครื่อง ส่วนในกรณีปิดแหล่งจ่ายฯ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันออกทั้งสองกรณีมีความต่างกันเพียงเล็กน้อย เพราะโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันแบบฉับพลันได้

#### 4.3.3 โหลดมอเตอร์ฟัด 12 V

เนื่องจากวงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับโหลดที่เป็นมอเตอร์ ดังนั้นการทดสอบวงจรเพื่อจ่ายแรงดันให้แก่โหลดที่เป็นมอเตอร์จึงเป็นการศึกษาสัญญาณขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายฯว่าผลของสัญญาณจะออกมาเป็นลักษณะใดเมื่อเทียบกับการจ่ายให้แก่โหลดชนิดอื่นๆ

เมื่อนำวงจรที่สร้างขึ้นไปทดสอบใช้งานกับโหลดที่เป็นมอเตอร์ฟัด 12 V ได้ผลของสัญญาณแรงดันขณะเปิดแหล่งจ่ายฯดังรูปที่ 4.5

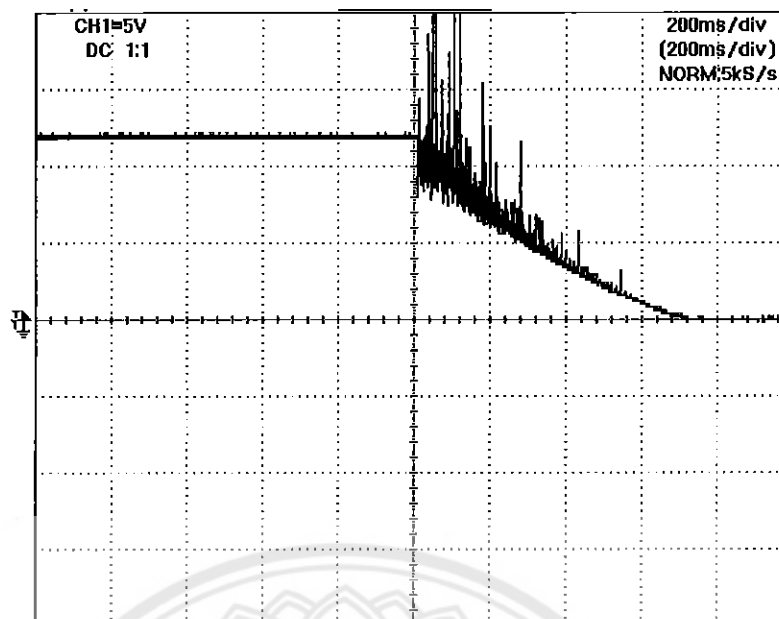


รูปที่ 4.5 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯเมื่อขนาดตัวเก็บประจุ  $C_2 = 10 \mu\text{F}$

สัญญาณแรงดันออกในช่วงเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งมีค่าประมาณ 12 V ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 600 ms มอเตอร์กินกระแส 1.23 A ลักษณะของสัญญาณที่ได้มีการกระโดดในช่วงแรกประมาณ 1.9 V จากนั้นสัญญาณถึงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นไปจนกระทั่งทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน แรงดันถึงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันชี้กำลังจนกระทั่งถึงแรงดันพิกัดมอเตอร์ ซึ่งมีลักษณะรูปสัญญาณคล้ายสัญญาณแรงดันเริ่มต้นของการนำวงจรทดลองไปทดสอบกับโหลดประเภทอื่นๆ และเมื่อปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง พบว่าวงจรมีการคายพลังงานผ่านตัวต้านทานภายในวงจรฯและคายผ่านตัวมอเตอร์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.6

ในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายฯ ตัวเก็บประจุใช้ระยะเวลาคายประจุให้แก่มอเตอร์ก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 750 ms จะพบว่าก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว สัญญาณแรงดันออกมีการกระชากมากในช่วงแรก และการกระชากของสัญญาณจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อสัญญาณเข้าสู่สถานะอยู่ตัว การกระชากของสัญญาณดังกล่าวมีสาเหตุมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านของตัวมอเตอร์ (Counter EMF) ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วยกกำลังของมอเตอร์ กล่าวคือ ความเฉื่อยของมอเตอร์ทำให้ความเร็วยกกำลังตกค้าง ส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านนี้มีค่าลดลงช้า จนมีช่วงเวลาที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านนี้มีค่าสูงกว่าแรงดันตกคร่อม  $C_2$  ซึ่งกำลังคายประจุ ส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์เข้าสู่  $C_2$  ทำให้เกิดการกระชากของสัญญาณเป็นช่วง ๆ





รูปที่ 4.6 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายฯ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนลงในตารางที่ 4.7 พบว่าระยะเวลาในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายฯจนถึงสถานะอยู่ตัวของโหลดมอเตอร์ฟัด 12 V เป็นเวลา 600 ms ซึ่งไวกว่าระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายฯ 150 ms เนื่องจากการคายพลังงานของวงจรผ่านตัวมอเตอร์ในขณะที่ปิดแหล่งจ่ายฯด้วย (รูปที่ 4.6)

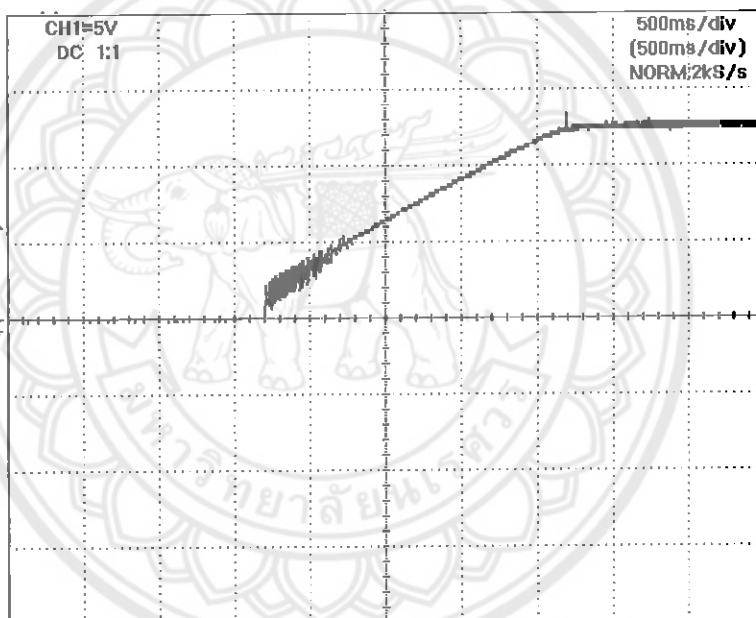
ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ฟัด 12 V

การทำงาน	การทดสอบ
เปิดแหล่งจ่าย	600 ms
ปิดแหล่งจ่าย	750 ms

ลักษณะของสัญญาณที่แกว่งไปแกว่งมาของสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ฟัด 12 V ในรูปที่ 4.6 หลังจากเปิดสวิตซ์ของแหล่งจ่ายฯ เกิดจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ของวงจรทดสอบผ่านมอเตอร์ ซึ่งเป็นโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทำให้จากเดิมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่คายประจุให้แก่ตัวต้านทานภายในวงจรอย่างเดียวดังต้องมาคายประจุให้แก่มอเตอร์ด้วย กลายเป็นวงจรอันดับที่สอง

การทดสอบเพิ่มระยะเวลาเริ่มเดินมอเตอร์ให้นานขึ้น เพื่อขยายขอบเขตของการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้น โดยใช้หลักการของวงจร RC คือการเพิ่มระยะเวลาในการเริ่มเดินเครื่อง ด้วยการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ  $C_2$  และเพิ่มขนาดของตัวต้านทาน  $R_3$

การเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุจาก  $10 \mu\text{F}$  เป็น  $33 \mu\text{F}$  ทำให้ระยะเวลาในขณะที่เก็บประจุเพิ่มขึ้นจาก  $600 \text{ ms}$  เป็น  $1.8 \text{ s}$  ดังรูปที่ 4.7 สามารถอธิบายได้ว่า ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากผลคูณระหว่างตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ หรือค่าคงตัวทางเวลานั่นเอง เมื่อขนาดของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นและขนาดของตัวต้านทานมีค่าเท่าเดิม ระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวจะเพิ่มขึ้นตามผลคูณนี้ ระยะเวลาในการเก็บประจุจึงเพิ่มตาม ผลทดสอบนี้สามารถบอกได้ว่าการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯได้

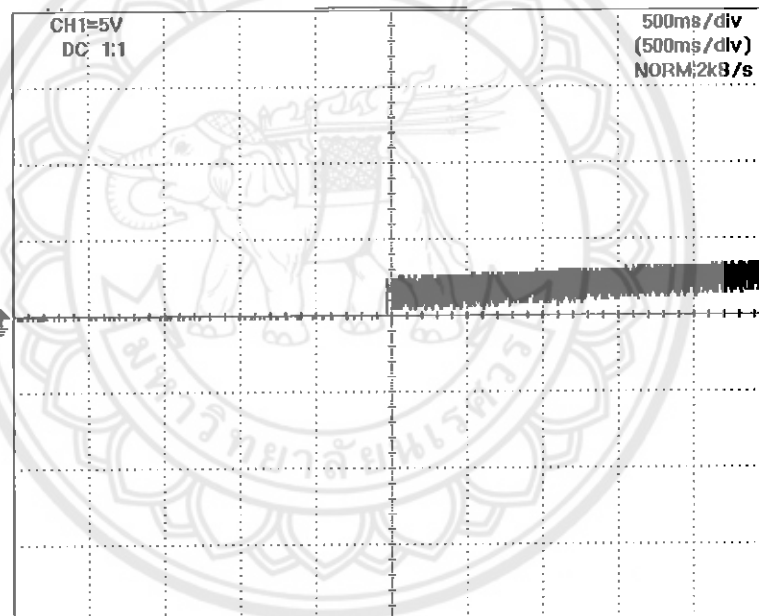


รูปที่ 4.7 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดแหล่งจ่ายเมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ  $C_2 = 33 \mu\text{F}$

มอเตอร์ต้องการแรงดันเริ่มต้นระดับหนึ่งเพื่อเอาชนะแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่อง การเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าคงตัวทางเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มเดินเครื่องนานขึ้น จากรูปที่ 4.7 สังเกตแรงดันเข้ามีการกระชากเป็นช่วง ๆ สาเหตุเป็นเพราะแรงดันเริ่มต้นไม่สามารถเอาชนะแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ได้จึงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านของมอเตอร์คายพลังงานย้อนกลับออกมาเนื่องจากในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายฯ ตัวเก็บประจุใช้ระยะเวลาเก็บประจุให้แก่มอเตอร์ก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่  $1.8 \text{ s}$  จะพบว่าก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว สัญญาณแรงดันเข้ามีการกระชากมากในช่วงแรก และการกระชากของสัญญาณจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อสัญญาณเข้าสู่สถานะอยู่

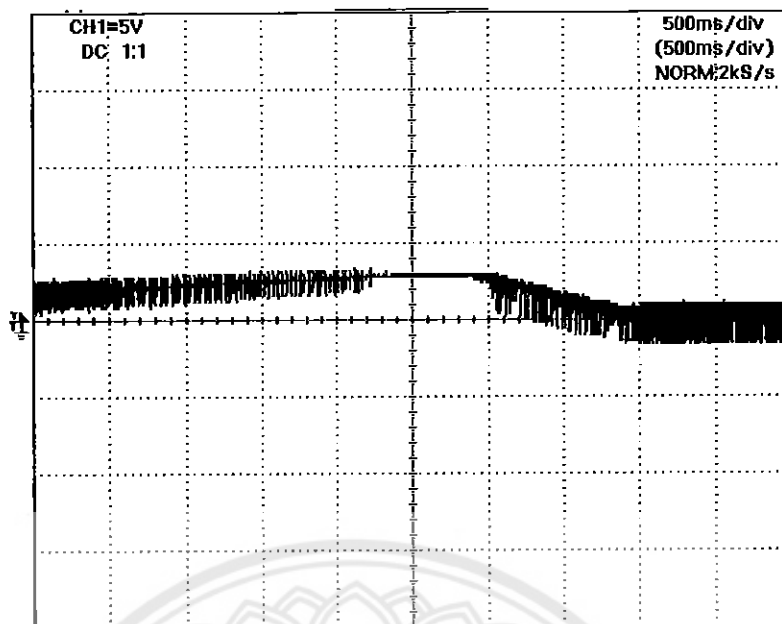
ตัว การกระชากของสัญญาณดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุจนทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นช้ากว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านของตัวมอเตอร์ ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ กล่าวคือ ในขณะที่เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายมอเตอร์จะเริ่มหมุนทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีช่วงเวลาที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านมีค่าสูงกว่าแรงดันตกคร่อม  $C_2$  ซึ่งกำลังคายประจุ ส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์เข้าสู่  $C_2$  ทำให้เกิดการกระชากของสัญญาณเป็นช่วง ๆ

การเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุเป็น  $470 \mu\text{F}$  ทำให้วงจรหยุดการทำงานก่อน เพราะมอเตอร์ดึงกระแสสูงกว่าพิกัดเพื่อเอาชณะแรงบิดเริ่มต้นได้นานกว่าที่ควรดังรูปที่ 4.8 อุปกรณ์ภายในไม่สามารถทนกระแสที่มอเตอร์ดึงได้ จึงเกิดความร้อนสะสมที่วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายแบบนุ่มนวล และตัวมอเตอร์ทำให้ไอซี LM317 ที่มีระบบป้องกันกระแสไหลกลับตัดการทำงานของวงจร (รูปที่ 4.9)



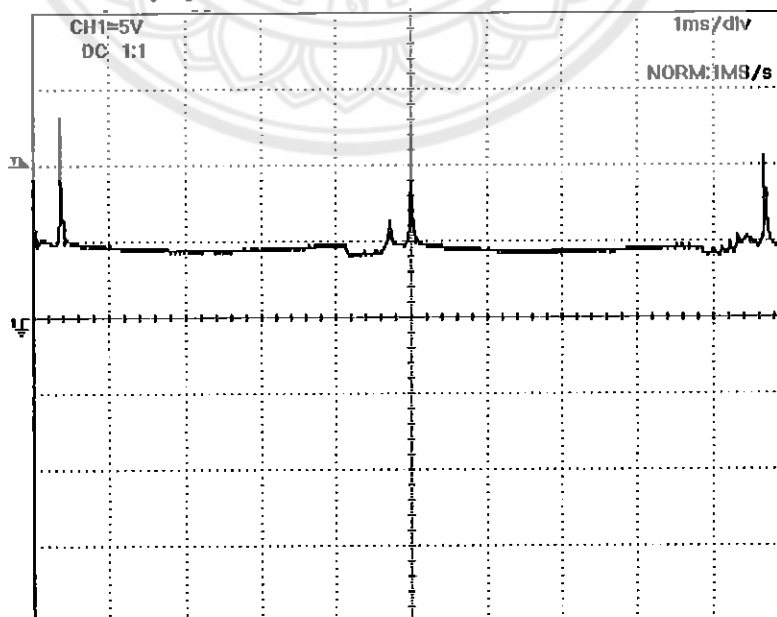
รูปที่ 4.8 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดแหล่งจ่ายเมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ  $C_2 = 470 \mu\text{F}$

การแกว่งของสัญญาณในรูปที่ 4.8 เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านของมอเตอร์ในขณะที่เปิดแหล่งจ่ายมีแรงดันไม่เพียงพอที่จะเอาชณะแรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์ เนื่องจากการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเดินเครื่องนานขึ้น และทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในบางช่วงจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านของตัวมอเตอร์ ส่งผลให้ช่วงเวลาที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านมีค่าสูงกว่าแรงดันตกคร่อม  $C_2$  ที่กำลังเก็บประจุ จึงเกิดกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์เข้าสู่  $C_2$  ทำให้เกิดการกระชากของสัญญาณเป็นช่วง ๆ



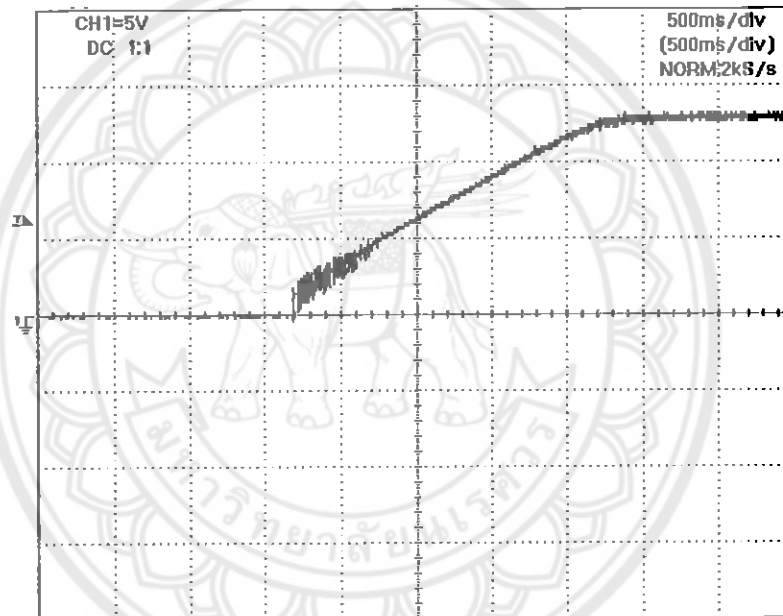
รูปที่ 4.9 แรงดันมอเตอร์ขณะเกิดกระแสไหลล้นเกิน

รูปที่ 4.9 มอเตอร์พยายามดึงกระแสเพื่อจะเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นแต่อุปกรณ์ภายในทนอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ไหวจนกระทั่งต้องตัดการทำงาน ส่วนการแกว่งของสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้าน ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ กล่าวคือ ความเฉื่อยของมอเตอร์ทำให้ความเร็วรอบตกลงชั่วสักระยะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านมีค่าลดลงชั่วขณะที่มีช่วงเวลาที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านมีค่าสูงกว่าแรงดันตกคร่อม  $C_2$  ซึ่งกำลังคายประจุ ส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์เข้าสู่  $C_2$  ทำให้เกิดการกระชากของสัญญาณเป็นช่วง ๆ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แรงดันมอเตอร์ขณะเกิดกระแสไหลล้นเกินเมื่อลดเวลาเป็น 1 ms

การเพิ่มขนาดของตัวต้านทาน  $R_3$  จะส่งผลทำให้ระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเพิ่มขึ้นตามสมการค่าคงตัวทางเวลา  $5\tau = RC$  เมื่อเพิ่มขนาดความต้านทานหรือขนาดตัวเก็บประจุจะทำให้ระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเพิ่มขึ้นตาม บวกกับการเพิ่มขนาดของตัวต้านทาน  $R_3$  จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  น้อยลงเพราะในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานที่สภาวะไบแอสคงที่จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_3 = 0.7 \text{ V}$  เสมอ สังเกตรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์เมื่อเพิ่มขนาดตัวต้านทานเป็น  $10 \text{ k}\Omega$  พบว่าช่วงแรกของสัญญาณแรงดันจะมีการเพิ่มขึ้นของสัญญาณแบบทันทีที่  $1.9 \text{ V}$  จากนั้นจะมีการแกว่งของสัญญาณเนื่องจากวงจรจ่ายแรงดันให้แก่โหลดประเภทมอเตอร์ ซึ่งเป็นโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำ จึงทำให้สัญญาณมีการแกว่ง ส่วนระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวจะเกิดจากปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  และ  $R_2$  เช่นเดียวกับรูปที่ 4.5 (แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดสวิตช์แหล่งจ่ายฯ)



รูปที่ 4.11 แรงดันมอเตอร์ขณะเปิดแหล่งจ่ายฯเมื่อเพิ่มขนาดตัวต้านทานเป็น  $10 \text{ k}\Omega$

การทดสอบเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ไม่สามารถเพิ่มระยะเวลาในขณะเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯมากขึ้นได้เพราะมอเตอร์ต้องการแรงดันเริ่มต้นที่มากพอที่จะเอาชนะแรงบิดเริ่มเดินเครื่อง การเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ  $C_2$  และตัวต้านทาน  $R_3$  ที่มากเกินไปจะทำให้วงจรไม่สามารถขับมอเตอร์ได้ ส่วนลักษณะของสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 คล้ายกัน แตกต่างกันเฉพาะระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินโครงการ และพร้อมให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

ในโครงการนี้ได้มีการศึกษาการทำงานของวงจรอันดับที่หนึ่งชนิดวงจร RC วงจรคุมค่าแรงดันปรับค่าได้ วงจรควบคุมกระแส เพื่อออกแบบและสร้างตัวลดกระแสไฟกระชากขณะเปิดปิดแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง โดยวงจรถูกออกแบบสำหรับรับแรงดันได้ไม่เกิน 40 V สามารถปรับค่าแรงดันเพื่อจ่ายให้แก่โหลดได้ในช่วง 1.25 - 37 V กระแสสูงสุดที่ 1.5 A

จากผลการทดสอบโดยให้วงจรรับแรงดันเข้า 20 V เพื่อจ่ายให้กับโหลดที่แรงดัน 16.4 V จะเห็นว่าระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวขณะเริ่มเปิดสวิทช์ของแหล่งจ่ายจะมีค่าคงที่ที่ 700 ms และลักษณะของสัญญาณจะแบ่งออกเป็นสองช่วงต่อเนื่องกัน คือช่วงการเพิ่มขึ้นแบบขั้น และช่วงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของสัญญาณมีลักษณะไม่แตกต่างกันถึงแม้จะมีการเปลี่ยนชนิดของโหลด ในขณะที่การลดลงของสัญญาณในช่วงการปิดสวิทช์ของแหล่งจ่ายมีลักษณะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดเนื่องจากมีค่าคงตัวทางเวลาต่างกัน

#### 5.2 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

- 1) เนื่องจากมอเตอร์เป็นโหลดที่ดึงกระแสสูง ดังนั้นการป้อนกระแสสูงเกินพิกัดนาน ๆ จะทำให้ตัวควบคุมแรงดันหยุดทำงาน เพราะอุณหภูมิใน LM317 สูงกว่าข้อกำหนดของไอซี แนวทางแก้ไขคือการเปลี่ยนไอซีคุมค่าแรงดัน จากเดิมใช้ LM317 ที่จ่ายกระแสสูงสุดได้ 1.5 A เป็น LM138 หรือ LM338 ที่สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ที่ 3 A และ 5 A ตามลำดับ ทั้งนี้การเลือกใช้ไอซีต้องขึ้นอยู่กับความต้องการของโหลดด้วย

- 2) การเพิ่มระยะเวลาในขณะที่เริ่มเดินแหล่งจ่ายฯใน โหลดมอเตอร์ ไม่สามารถเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ได้ เนื่องจากการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุทำให้กระแสช่วงเริ่มเดินแหล่งจ่ายฯมีค่าสูงเนื่องจากมอเตอร์ดึงกระแสสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความร้อนที่ตัว ไอซี จนทำให้ไอซีตัดการทำงานของวงจร แนวทางแก้ไขคือการเพิ่มขนาดของตัวต้านทาน  $R_3$  แทนเพราะการเพิ่มขนาดของตัวต้านทานทำให้กระแสที่ผ่านตัวต้านทานเพื่อไปสะสมที่ตัวเก็บประจุมีค่าน้อยลง

### 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

วงจรเริ่มเดินแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงแบบนุ่มนวลนิยมใช้สำหรับจ่ายกระแสให้แก่ โหลดมอเตอร์ ซึ่งดึงกระแสสูง เนื่องจากแรงบิดเริ่มเดินของมอเตอร์มีค่าแปรผันตามขนาดของแรงดันยกกำลังสอง ดังนั้น ถ้าเริ่มปรับแรงดันจากศูนย์ โวลต์ แรงบิดก็จะเริ่มจากศูนย์เช่นกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงบิดในการเริ่มเดินมอเตอร์ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมเริ่มปรับแรงดันจากศูนย์ แต่จะเริ่มด้วยระดับแรงดันค่าหนึ่งที่สามารถสร้างแรงบิดของมอเตอร์ให้สามารถเอาชนะแรงบิดของ โหลดเพื่อให้มอเตอร์เริ่มออกตัวได้ ด้วยเหตุนี้ค่ากระแสชากจึงไม่ได้เริ่มจากศูนย์ แต่จะเริ่มที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งจะมากน้อยเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่เริ่มเดินมอเตอร์และค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ การเปลี่ยน ไอซี เพื่อเพิ่มพิกัดการจ่ายกระแสให้สูงขึ้นอาจยังไม่เพียงพอที่จะขับมอเตอร์ที่มีพิกัดสูงขึ้นได้ ดังนั้นการศึกษาเรื่องแรงบิดเริ่มเดินเพื่อเอาชนะแรงบิดของ โหลดจึงเป็นสิ่งที่ควรศึกษาต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ลักษณ์ฉวี กิจจารักษ์ “เรื่อนำรู้เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า” จาก [www.ee.mut.ac.th/home/peerapol/semi\\_6.htm](http://www.ee.mut.ac.th/home/peerapol/semi_6.htm), สืบค้นเมื่อ 26 กันยายน 2553
- [2] เจษฎา ชินรุ่งเรือง “ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น”, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2551
- [3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี “วงจรอันดับที่หนึ่ง” จาก [www.eng.sut.ac.th/me/meold/3\\_2551/425308/ACS31.pdf](http://www.eng.sut.ac.th/me/meold/3_2551/425308/ACS31.pdf), สืบค้นเมื่อ 26 กันยายน 2553
- [4] สรวุฒิ สุจิตร์ “วงจรไฟฟ้า”, บริษัทเพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด, กรุงเทพฯ, 2547
- [5] คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ “ระบบควบคุม” จาก [www.mylesson.swu.ac.th/syllabus/doc\\_3420040430141710.pdf](http://www.mylesson.swu.ac.th/syllabus/doc_3420040430141710.pdf), สืบค้นเมื่อ 26 กันยายน 2553
- [6] พันธุ์ศักดิ์ พุฒิตานิตพงษ์, “อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และวงจร 1”, ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, กรุงเทพฯ, 2538
- [7] Miroslav Adzic “วงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบนุ่มนวล” จาก [www.eleccircuit.com/soft-start-power-supply-with-ic-lm317-and-l200/](http://www.eleccircuit.com/soft-start-power-supply-with-ic-lm317-and-l200/), สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2553
- [8] สุคนธ์ พุ่มศรี “วงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1”, บริษัทดวงกมล จำกัด, กรุงเทพฯ, 2544
- [9] เดชวุฒิ ขาวปริสุทธิ์ (Engineering circuit analysis) “วิเคราะห์วงจรไฟฟ้า”, บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ, 2551
- [10] คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี “อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น” จาก [www.ee.kmutt.ac.th/](http://www.ee.kmutt.ac.th/), สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2553
- [11] รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ “การออกแบบแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า” จาก [www.te.kmutnb.ac.th/~msn/221419power.pdf](http://www.te.kmutnb.ac.th/~msn/221419power.pdf), สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2553







**LM117/217  
LM317**

## 1.2V TO 37V VOLTAGE REGULATOR

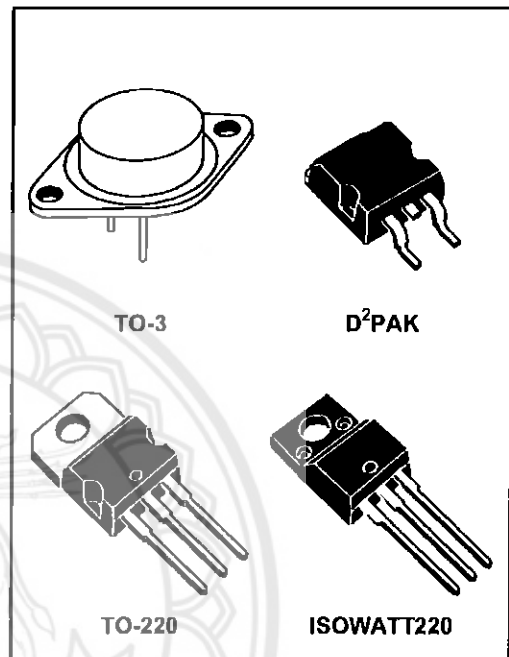
- OUTPUT VOLTAGE RANGE : 1.2 TO 37V
- OUTPUT CURRENT IN EXCESS OF 1.5A
- 0.1% LINE AND LOAD REGULATION
- FLOATING OPERATION FOR HIGH VOLTAGES
- COMPLETE SERIES OF PROTECTIONS :  
CURRENT LIMITING, THERMAL  
SHUTDOWN AND SOA CONTROL

### DESCRIPTION

The LM117/LM217/LM317 are monolithic integrated circuit in TO-220, ISOWATT220, TO-3 and D<sup>2</sup>PAK packages intended for use as positive adjustable voltage regulators.

They are designed to supply more than 1.5A of load current with an output voltage adjustable over a 1.2 to 37V range.

The nominal output voltage is selected by means of only a resistive divider, making the device exceptionally easy to use and eliminating the stocking of many fixed regulators.



### ABSOLUTE MAXIMUM RATING

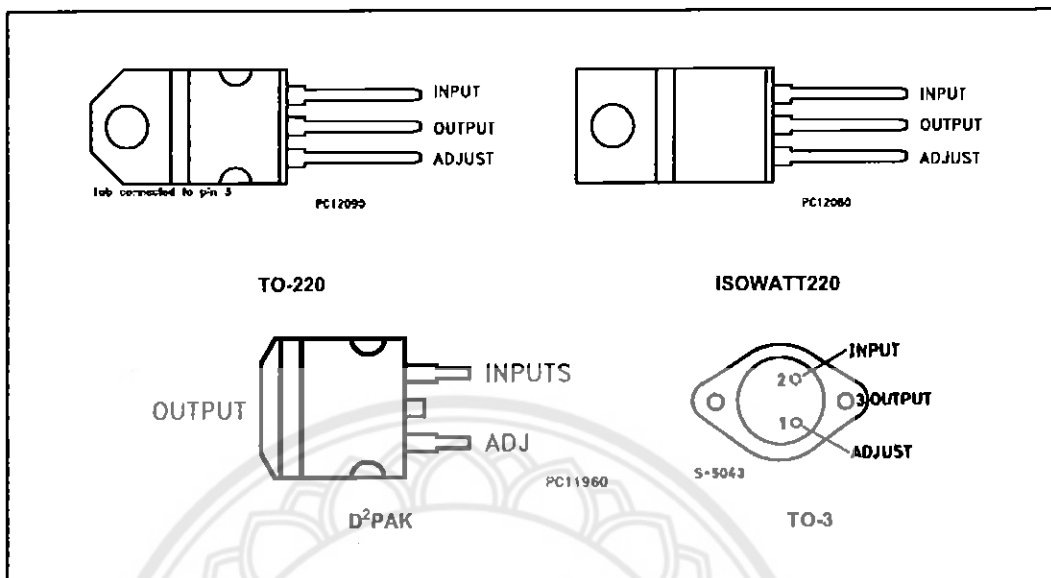
Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{I-o}$	Input-output Differential Voltage	40	V
$I_o$	Output Current	Internally Limited	
$T_{op}$	Operating Junction Temperature for: LM117 LM217 LM317	-55 to 150 -25 to 150 0 to 125	°C °C °C
$P_{tot}$	Power Dissipation	Internally Limited	
$T_{stg}$	Storage Temperature	- 65 to 150	°C

### THERMAL DATA

Symbol	Parameter	TO-3	TO-220	ISOWATT220	D <sup>2</sup> PAK	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	4	3	4	3	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	35	50	60	62.5	°C/W

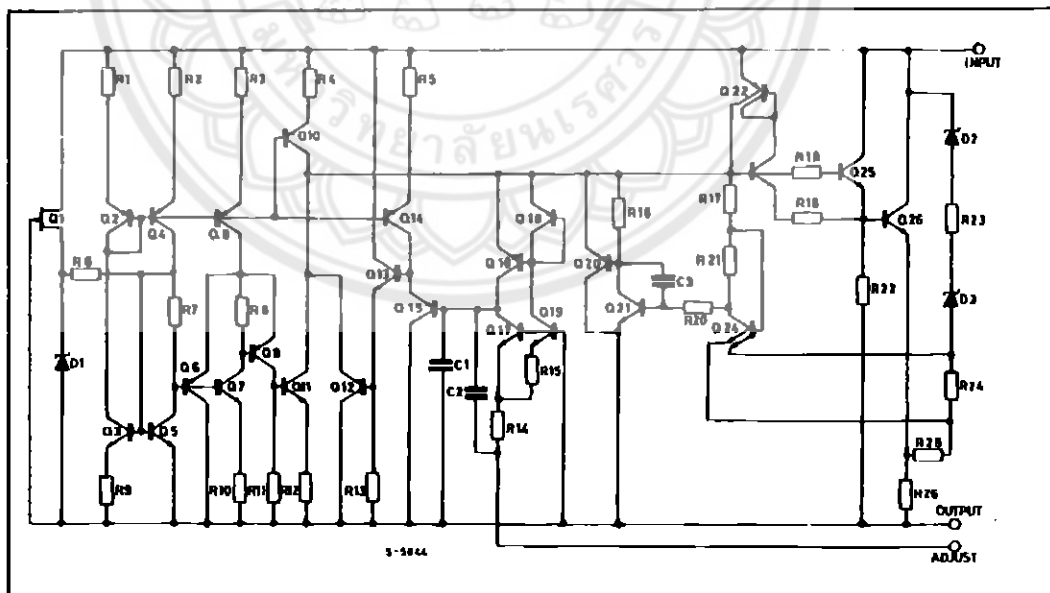
LM117/217/317

CONNECTION DIAGRAM AND ORDERING NUMBERS (top view)



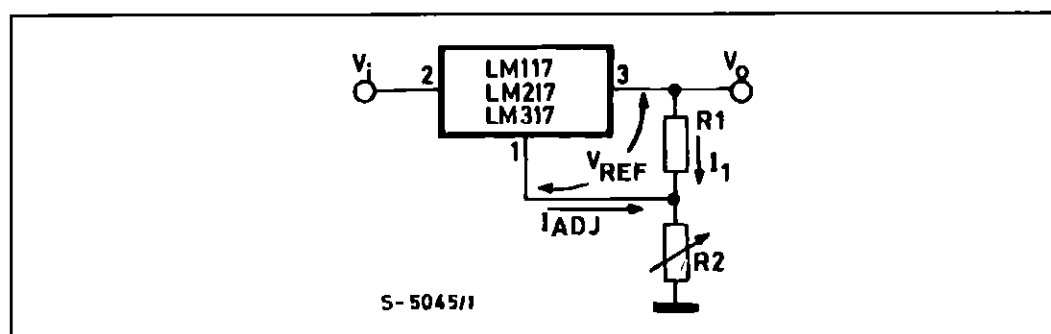
Type	TO-3	TO-220	ISOWATT220	D <sup>2</sup> PAK
LM117	LM117K			
LM217	LM217K	LM217T		LM217D2T
LM317	LM317K	LM317T	LM317P	LM317D2T

SCHEMATIC DIAGRAM



## LM117/217/317

## BASIC ADJUSTABLE REGULATOR



**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_i - V_o = 5\text{ V}$ ,  $I_o = 500\text{ mA}$ ,  $I_{MAX} = 1.5\text{ A}$  and  $P_{MAX} = 20\text{ W}$ , unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	LM117/LM217			LM317			Unit	
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
$\Delta V_o$	Line Regulation	$V_i - V_o = 3\text{ to }40\text{ V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.02		0.01	0.04	%/V	
				0.02	0.05		0.02	0.07	%/V	
$\Delta V_o$	Load Regulation	$V_o \leq 5\text{ V}$ $I_o = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	5	15		5	25	mV	
				20	50		20	70	mV	
		$V_o \geq 5\text{ V}$ $I_o = 10\text{ mA to }I_{MAX}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	0.1	0.3		0.1	0.5	%	
				0.3	1		0.3	1.5	%	
$I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current			50	100		50	100	$\mu\text{A}$	
$\Delta I_{ADJ}$	Adjustment Pin Current	$V_i - V_o = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_o = 10\text{ mA to }I_{MAX}$		0.2	5		0.2	5	$\mu\text{A}$	
$V_{REF}$	Reference Voltage (between pin 3 and pin 1)	$V_i - V_o = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_o = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $P_D \leq P_{MAX}$	1.2	1.25	1.3	1.2	1.25	1.3	V	
$\frac{\Delta V_o}{V_o}$	Output Voltage Temperature Stability			1			1		%	
$I_{o(min)}$	Minimum Load Current	$V_i - V_o = 40\text{ V}$		3.5	5		3.5	10	mA	
$I_{o(max)}$	Maximum Load Current	$V_i - V_o \leq 15\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$	1.5	2.2		1.5	2.2		A	
		$V_i - V_o = 40\text{ V}$ $P_D < P_{MAX}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$		0.4			0.4		A	
$e_N$	Output Noise Voltage (percentage of $V_o$ )	$B = 10\text{ Hz to }10\text{ KHz}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$		0.003			0.003		%	
SVR	Supply Voltage Rejection (*)	$T_j = 25^\circ\text{C}$ $f = 120\text{ Hz}$	$C_{ADJ} = 0$		65			65		dB
			$C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$	66	80		66	80		dB

(\*)  $C_{ADJ}$  is connected between pin 1 and ground.

Note:

(1) Unless otherwise specified the above specs, apply over the following conditions : LM 117  $T_j = -55\text{ to }150^\circ\text{C}$ ;  
LM 217  $T_j = -25\text{ to }150^\circ\text{C}$  ; LM 317  $T_j = 0\text{ to }125^\circ\text{C}$ .

LM117/217/317

Figure 1 : Output Current vs. Input-output Differential Voltage.

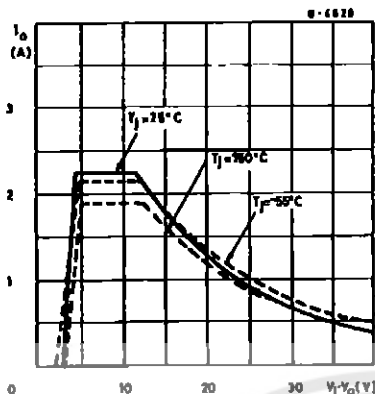


Figure 3 : Reference Voltage vs. Junction

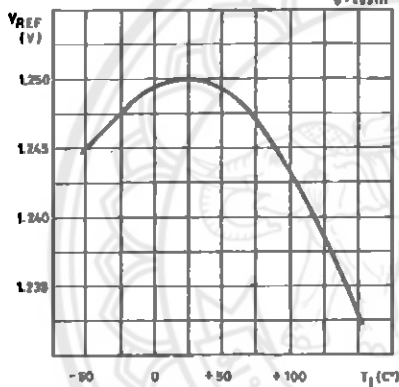


Figure 2 : Dropout Voltage vs. Junction Temperature.

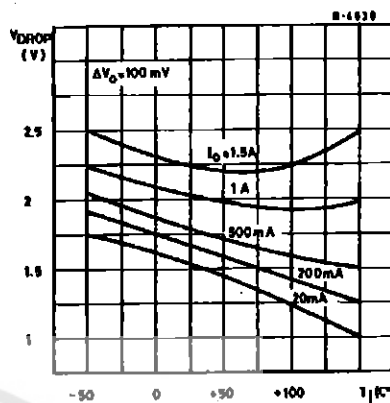
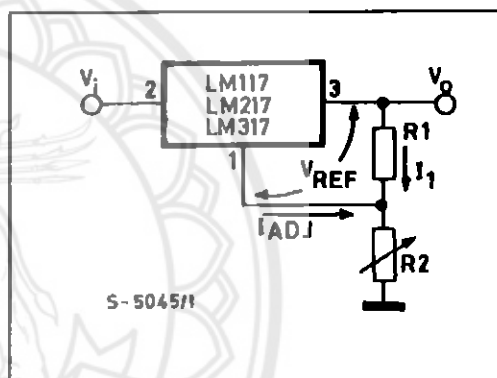


Figure 4 : Basic Adjustable Regulator.



APPLICATION INFORMATION

The LM117/217/317 provides an internal reference voltage of 1.25V between the output and adjustments terminals. This is used to set a constant current flow across an external resistor divider (see fig. 4), giving an output voltage Vo of:

$$V_O = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2$$

The device was designed to minimize the term  $I_{ADJ} \cdot R_2$  (100µA max) and to maintain it very constant with line and load changes. Usually, the error term  $I_{ADJ} \cdot R_2$  can be neglected. To obtain the previous requirement, all the regulator quiescent current is returned to the output terminal, imposing a minimum load current condition. If the load is insufficient, the output voltage will rise.

Since the LM117/217/317 is a floating regulator and "sees" only the input-to-output differential

voltage, supplies of very high voltage with respect to ground can be regulated as long as the maximum input-to-output differential is not exceeded. Furthermore, programmable regulator are easily obtainable and, by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the device can be used as a precision current regulator.

In order to optimise the load regulation, the current set resistor R1 (see fig. 4) should be tied as close as possible to the regulator, while the ground terminal of R2 should be near the ground of the load to provide remote ground sensing.

Performance may be improved with added capacitance as follow:

An input bypass capacitor of 0.1µF

An adjustment terminal to ground 10µF capacitor



to improve the ripple rejection of about 15 dB (CADJ).

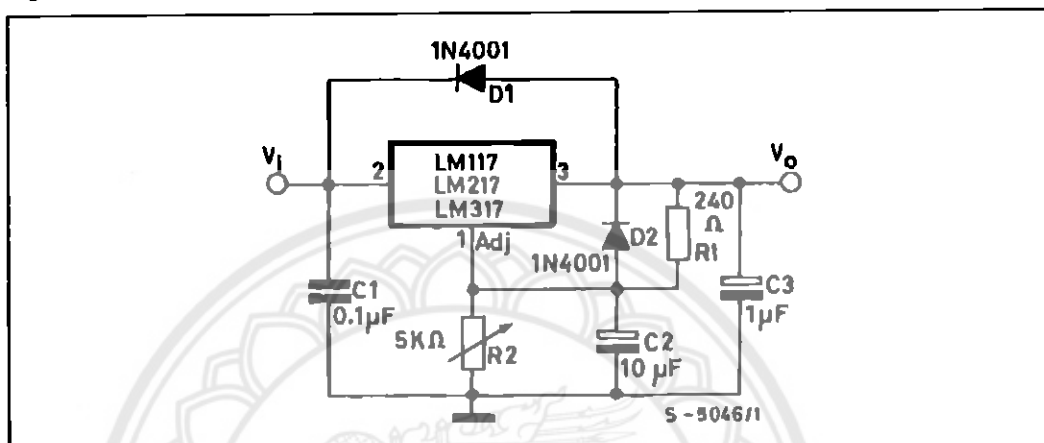
An 1µF tantalum (or 25µF Aluminium electrolytic) capacitor on the output to improve transient response.

In addition to external capacitors, it is good

practice to add protection diodes, as shown in fig.5.

D1 protect the device against input short circuit, while D2 protect against output short circuit for capacitance discharging.

Figure 5 : Voltage Regulator with Protection Diodes.



D1 protect the device against input short circuit, while D2 protects against output short circuit for capacitors discharging

Figure 6 : Slow Turn-on 15V Regulator.

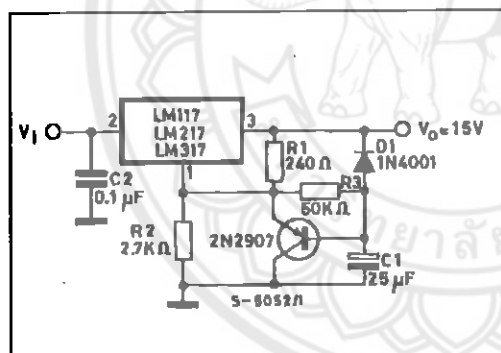
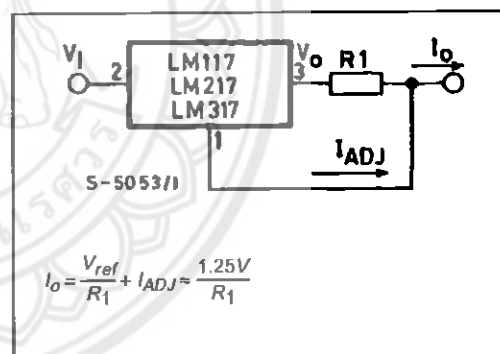


Figure 7 : Current Regulator.



LM117/217/317

Figure 8 : 5V Electronic Shut-down Regulator

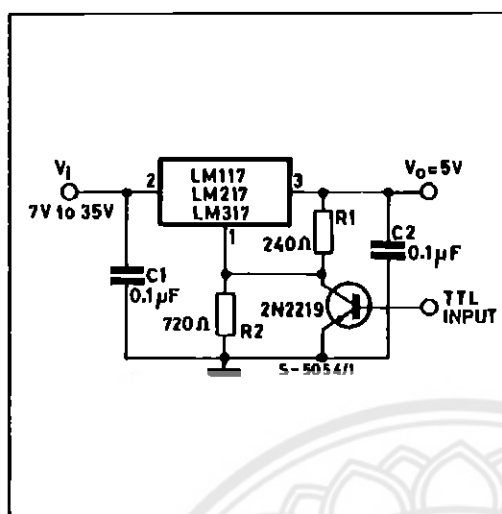


Figure 9 : Digitally Selected Outputs

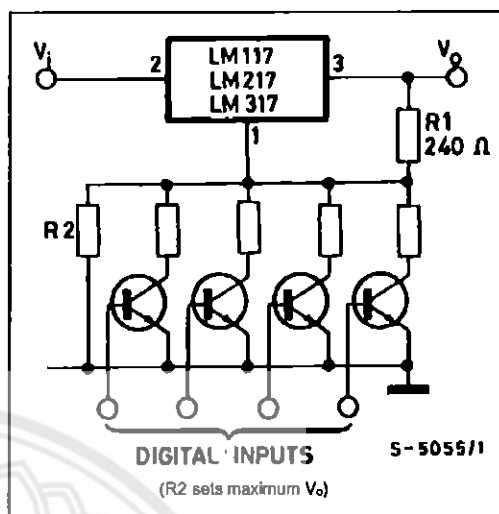


Figure 10 : Battery Charger (12V)

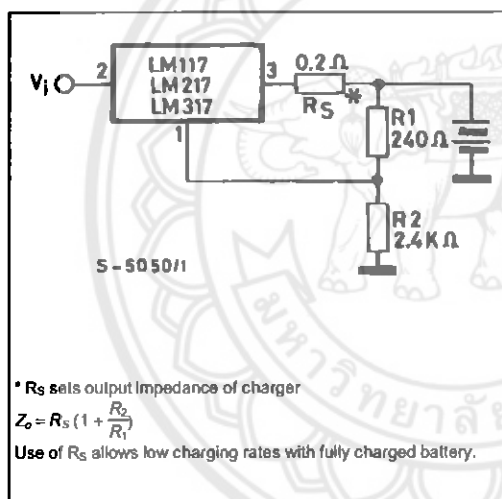
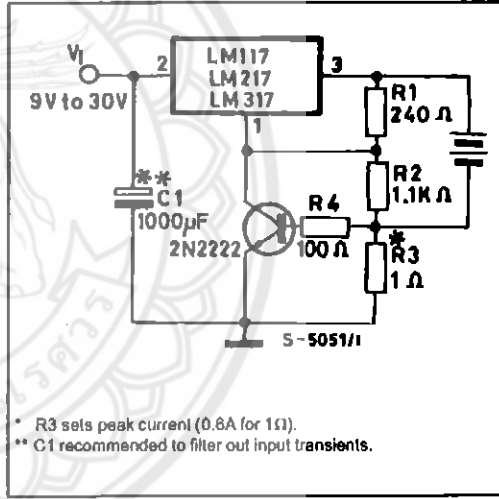
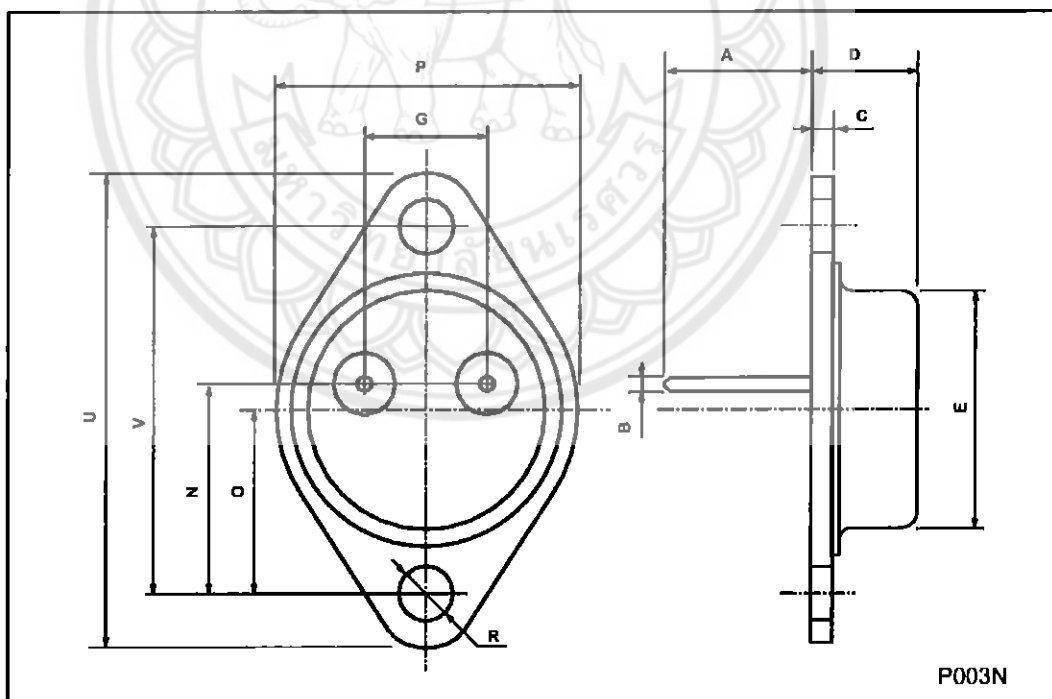


Figure 11 : Current Limited 6V Charger



## TO-3 (R) MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A		11.7			0.460	
B	0.96		1.10	0.037		0.043
C			1.70			0.066
D			8.7			0.342
E			20.0			0.787
G		10.9			0.429	
N		16.9			0.665	
P			26.2			1.031
R	3.88		4.09	0.152		0.161
U			39.50			1.555
V		30.10			1.185	

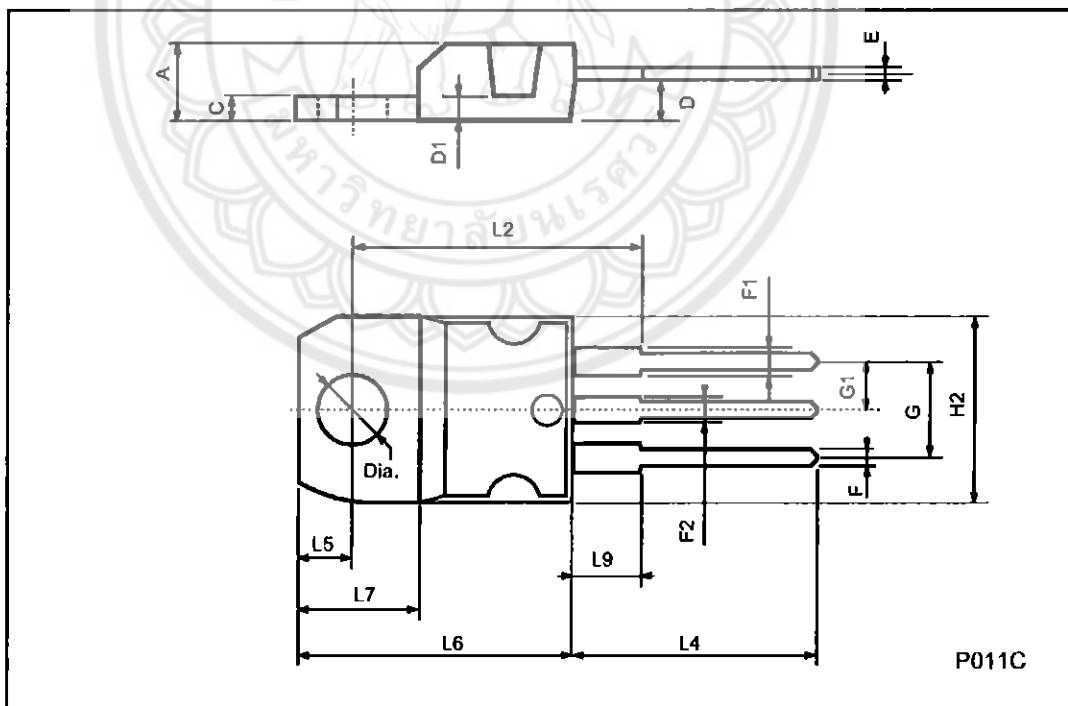




LM117/217/317

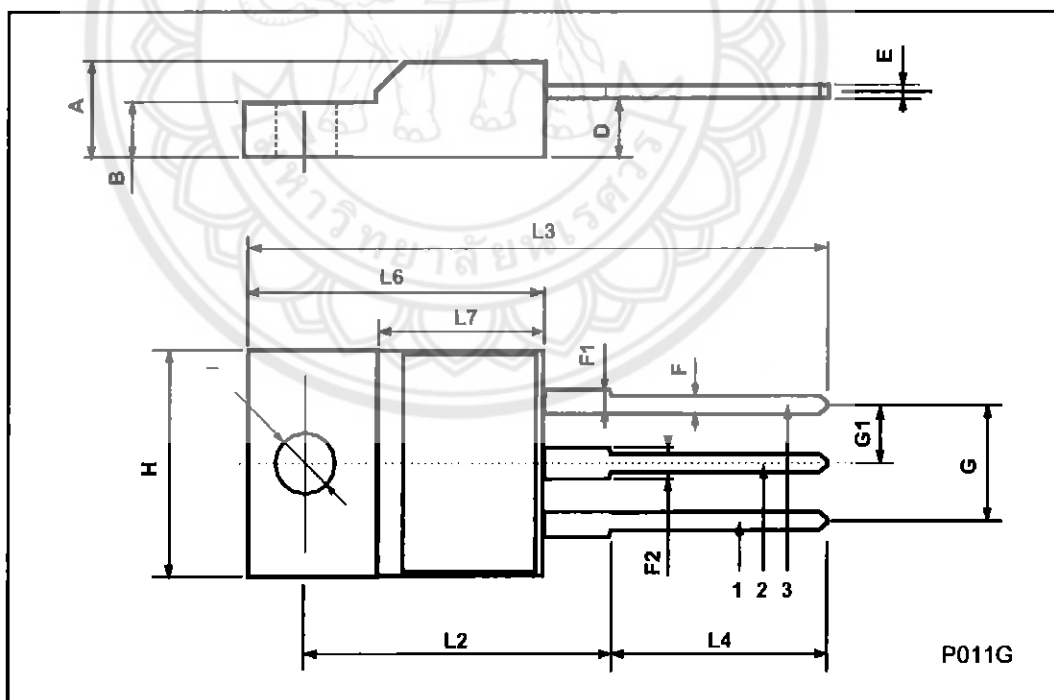
## TO-220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			Inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.087
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.25		15.75	0.600		0.620
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		3.93	0.137		0.154
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151



## ISOWATT220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.4		4.6	0.173		0.181
B	2.5		2.7	0.098		0.106
D	2.5		2.75	0.098		0.108
E	0.4		0.7	0.015		0.027
F	0.75		1	0.030		0.039
F1	1.15		1.7	0.045		0.067
F2	1.15		1.7	0.045		0.067
G	4.95		5.2	0.195		0.204
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H	10		10.4	0.393		0.409
L2		16			0.630	
L3	28.6		30.6	1.126		1.204
L4	9.8		10.6	0.385		0.417
L6	15.9		16.4	0.626		0.645
L7	9		9.3	0.354		0.366
Ø	3		3.2	0.118		0.126



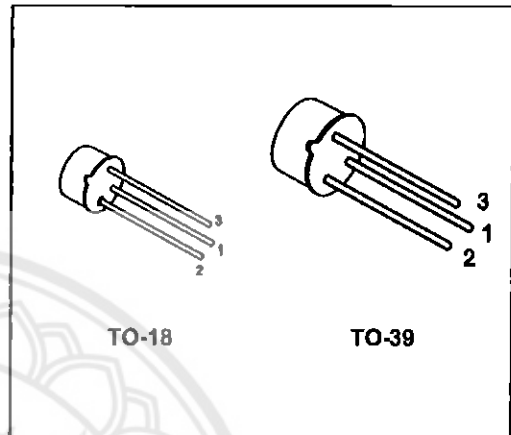


## GENERAL PURPOSE AMPLIFIERS AND SWITCHES

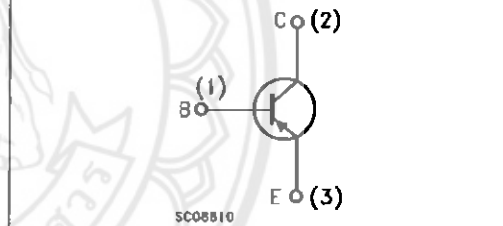
### DESCRIPTION

The 2N2905 and 2N2907 are silicon planar epitaxial PNP transistors in Jedec TO-39 (for 2N2905) and in Jedec TO-18 (for 2N2907) metal case. They are designed for high speed saturated switching and general purpose application.

- 2N2905 approved to CECC 50002-102,
- 2N2907 approved to CECC 50002-103 available on request.



### INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )	-60	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	-40	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	-5	V
$I_C$	Collector Current	-0.6	A
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2905 for 2N2907 at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2905 for 2N2907	0.6	W
		0.4	W
		3	W
		1.8	W
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 200	$^\circ\text{C}$
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	200	$^\circ\text{C}$

## 2N2905/2N2907

## THERMAL DATA

			TO-39	TO-18	
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-Case	Max	58.3	97.3	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-Ambient	Max	292	437.5	$^{\circ}\text{C/W}$

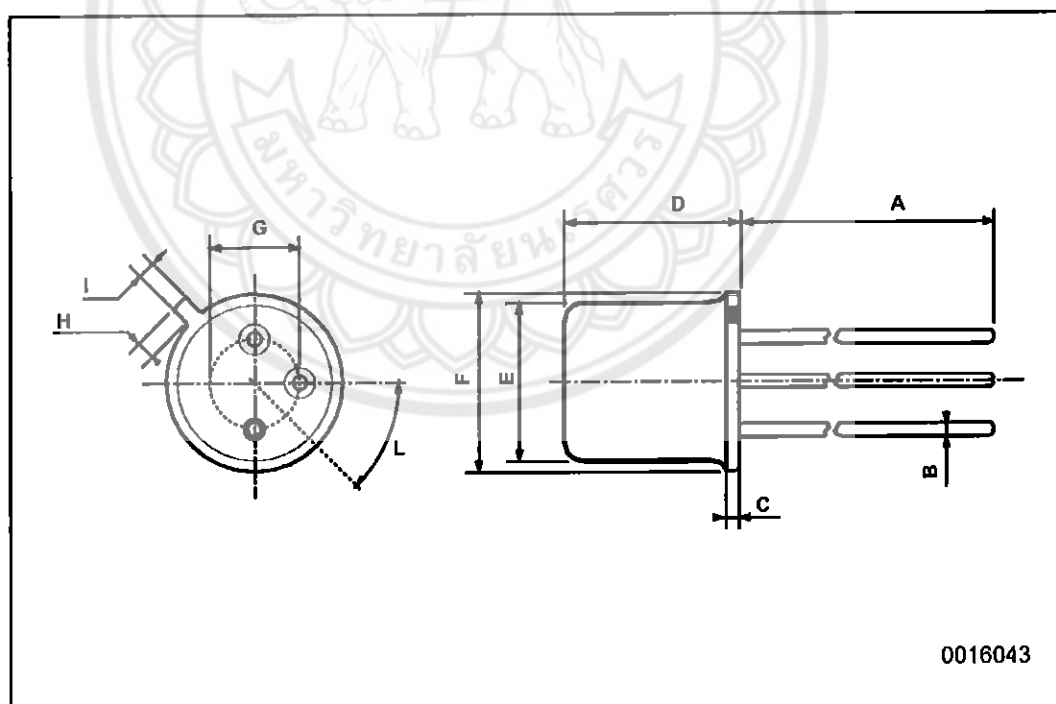
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current ( $I_E = 0$ )	$V_{CB} = -50\text{ V}$ $V_{CB} = -50\text{ V}$ $T_{case} = 150^{\circ}\text{C}$			-20 -20	nA $\mu\text{A}$
$I_{CEX}$	Collector Cut-off Current ( $V_{BE} = -0.5\text{V}$ )	$V_{CE} = -30\text{ V}$			-50	nA
$I_{BEX}$	Base Cut-off Current ( $V_{BE} = -0.5\text{V}$ )	$V_{CE} = -30\text{ V}$			-50	nA
$V_{(BR)CBO}^*$	Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )	$I_C = -10\ \mu\text{A}$	-60			V
$V_{(BR)CEO}^*$	Collector-Emitter Breakdown Voltage ( $I_B = 0$ )	$I_C = -10\ \text{mA}$	-40			V
$V_{(BR)EBO}^*$	Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 0$ )	$I_E = -10\ \mu\text{A}$	-5			V
$V_{CE(sat)}^*$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -150\ \text{mA}$ $I_B = -15\ \text{mA}$ $I_C = -500\ \text{mA}$ $I_B = -50\ \text{mA}$			-0.4 -1.6	V V
$V_{BE(sat)}^*$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -150\ \text{mA}$ $I_B = -15\ \text{mA}$ $I_C = -500\ \text{mA}$ $I_B = -50\ \text{mA}$			-1.3 -2.6	V V
$h_{FE}^*$	DC Current Gain	$I_C = -0.1\ \text{mA}$ $V_{CE} = -10\ \text{V}$ $I_C = -1\ \text{mA}$ $V_{CE} = -10\ \text{V}$ $I_C = -10\ \text{mA}$ $V_{CE} = -10\ \text{V}$ $I_C = -150\ \text{mA}$ $V_{CE} = -10\ \text{V}$ $I_C = -500\ \text{mA}$ $V_{CE} = -10\ \text{V}$	35 50 75 100 30		300	
$f_T$	Transition Frequency	$V_{CE} = -20\ \text{V}$ $f = 100\ \text{MHz}$ $I_C = -50\ \text{mA}$	200			MHz
$C_{EBO}$	Emitter Base Capacitance	$I_C = 0$ $V_{EB} = -2\ \text{V}$ $f = 1\ \text{MHz}$			30	pF
$C_{CBO}$	Collector Base Capacitance	$I_E = 0$ $V_{CB} = -10\ \text{V}$ $f = 1\ \text{MHz}$			8	pF
$t_d$	Delay Time	$V_{CC} = -30\ \text{V}$ $I_C = -150\ \text{mA}$ $I_{B1} = -15\ \text{mA}$			10	ns
$t_r$	Rise Time	$V_{CC} = -30\ \text{V}$ $I_C = -150\ \text{mA}$ $I_{B1} = -15\ \text{mA}$			40	ns
$t_s$	Storage Time	$V_{CC} = -6\ \text{V}$ $I_C = -150\ \text{mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = -15\ \text{mA}$			80	ns
$t_f$	Fall Time	$V_{CC} = -6\ \text{V}$ $I_C = -150\ \text{mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = -15\ \text{mA}$			30	ns

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 1\%$

## TO-18 MECHANICAL DATA

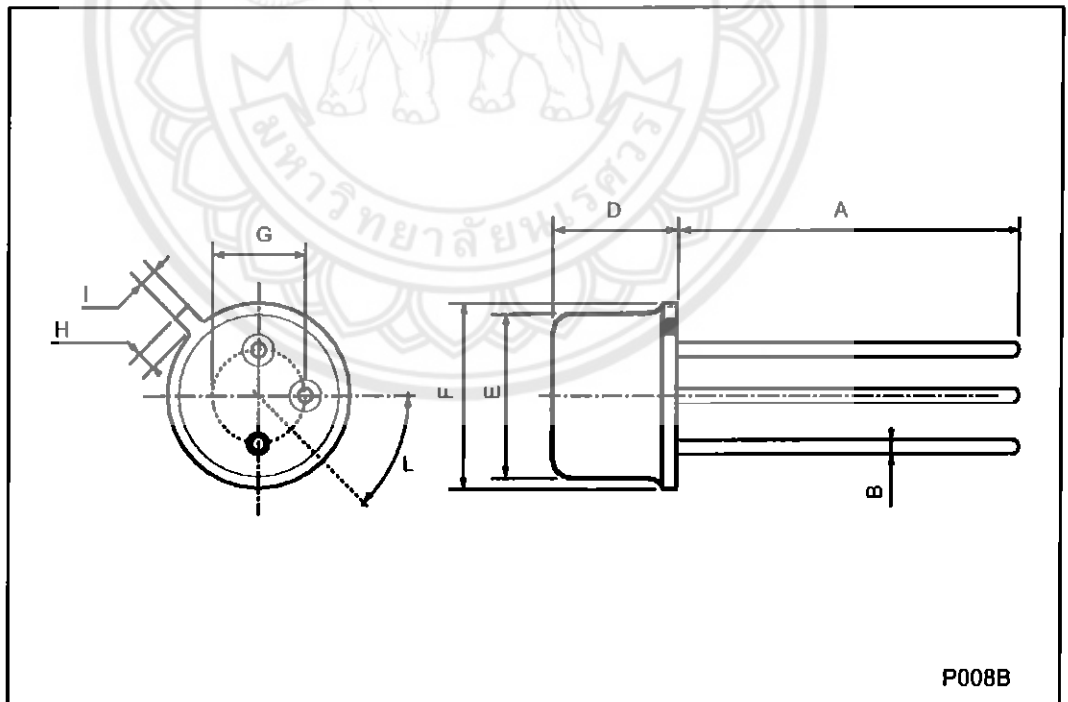
DIM.	mm			Inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A		12.7			0.500	
B			0.49			0.019
D			5.3			0.208
E			4.9			0.193
F			5.8			0.228
G	2.54			0.100		
H			1.2			0.047
I			1.16			0.045
L	45°			45°		



2N2905/2N2907

**TO-39 MECHANICAL DATA**

DIM.	mm			Inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	12.7			0.500		
B			0.49			0.019
D			6.6			0.260
E			8.5			0.334
F			9.4			0.370
G	5.08			0.200		
H			1.2			0.047
I			0.9			0.035
L	45° (typ.)					



P008B

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายนพรัตน์ สมพรพันธ์  
 ภูมิลำเนา 155/3 หมู่ 8 ต. ตาสัง อ. บรรพตพิสัย จ. นครสวรรค์  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนบรรพตพิสัยพิทยาคม  
 จ.นครสวรรค์  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 Email: noppoopza\_nop@hotmail.com



ชื่อ นายนิชนันท์ ชูปะสิทธิ์  
 ภูมิลำเนา 159/1 หมู่ 10 ต. บ้านกลาง อ. สอง จ. แพร่  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ พะเยา จ.พะเยา  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 Email: nichanan\_po@hotmail.com