# เครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์

# DYNAMIC INDUCTANCE/CAPACITANCE METER


โดย

นาย ขวัญชัย สุระไชย

นาย มาณพ มูสิกพรรณ

นาย สุชาย พร้อมศักดิ์

นาย สุเทพ พสุวณิชย์กุล



วัน เดือน ปี 1 ต.ค. 2540

เลขทะเบียน 037170

เลขเรียกหนังสือ T38263 ข44 ก


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2538**

**ภาควิชา** เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

**สาขาวิชา** วิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**เรื่อง** DYNAMIC INDUCTANCE/CAPACITANCE METER


**ผู้จัดทำ**

1. นาย ขวัญชัย สุระไชย 36013278
2. นาย มาณพ มูสิกพรรณ 36013299
3. นาย สุชาย พร้อมศักดิ์ 36013312
4. นาย สุเทพ พสุวณิชย์กุล 36013314

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ สักรียา ชิตวงศ์ )


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อปริญญานิพนธ์** | เครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์ |
| **จัดทำโดย** | นาย ขวัญชัย สุระไชย รหัสประจำตัว 36013278 |
| | นาย มาณพ มูสิกพรรณ รหัสประจำตัว 36013299 |
| | นาย สุชาย พร้อมศักดิ์ รหัสประจำตัว 36013312 |
| | นาย สุเทพ พสุวณิชย์กุล รหัสประจำตัว 36013314 |
| **ระดับการศึกษา** | ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต |
| | สาขาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม |
| **ภาควิชา** | เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม |
| **ปีการศึกษา** | 2538 |
| **อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์** | อ. สักรียา ชิตวงศ์ |

## บทคัดย่อ


ในการพัฒนาเครื่องมือวัด วัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความถี่ 2 ความถี่ ซึ่งความถี่แรกจะผลิตมาจากวงจร LC ออสซิลเลเตอร์ โดยความถี่ที่เกิดขึ้นเป็นความถี่รีโซแนนซ์ของวงจร RLC ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งความถี่ดังกล่าวเกิดมาจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุที่ไม่ทราบค่า และความถี่ที่สอง ได้มาจากวงจรโวลเตจคอนโทรลออสซิลเลเตอร์

การวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุมี 2 วิธี ซึ่งวิธีแรก จะใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ (Micro Computer) นับความถี่ และวิธีที่สองจะอาศัยความสัมพันธ์ของเฟส ทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ

ไมโครโปรเซสเซอร์(Microprocessor) จะทำการแซมเปิ้ล (Sample) เอาร์พุทของ LC ออสซิลเลเตอร์ โดยพอร์ตอินพุท ( Input Port) จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตาม LC ออสซิลเลเตอร์

ย่านความถี่ที่ใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุอยู่ในช่วง 100Hz-256kHz ค่าความผิดพลาด 5%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **THESIS** | DYNAMIC INDUCTANCE/CAPACITANCE METER |
| **BY** | MR. KWANCHAI SURACHAI |
| | MR. MANOP MUSIKAPARN |
| | MR. SUCHAI PROMSAK |
| | MR. SUTEP PASUVANITKUL |
| **DEGREE** | BACHELOR OF ENGINEERING |
| | INSTRUMENTATION ENGINEERING |
| **DEPARTMENT** | INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY |
| **ACADEMIC YEAR** | 1995 |
| **THESIS ADVISOR** | MR. SAKREYA CHITWONG |


## ABSTRACT

A mircoprocessor-based, dynamic inductance/capacitance meter has been developed. Two different approaches were examined utilizing the frequency response of the circuit where the unknown reactive element is includeed. One procedure uses an LC oscillator which generates a frequency that is proportional to the reactive elements,while the other employs the resonance response of an RLC circuit from which the unknown element can be determined by phase relationship. An 8088 processor detects the frequency counts in the first procedure,monitors the phase relationship in the second,and performs the required calculations for both. The microprocessor periodically samples the output of the LC oscillator at its input port to dynamically monitor the changes in the reactive circuit element. within 5% error over the frequency range of 100 Hz to 256 Khz and a wide range of inductance and capacitance values for both approaches have been determined.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


**บทนำ**

**บทที่ 1.ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ**

| | |
|---|---|
| การเหนี่ยวนำ | 1 |
| การเหนี่ยวนำภายในตัว | 1 |
| หน่วยของการเหนี่ยวนำ | 3 |
| อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อการเหนี่ยวนำภายในตัว | 5 |
| การเพิ่มและการลดของกระแสไฟฟ้าในวงจรอนุกรม R/L | 7 |
| เวลาคงที่ L/R | 10 |
| การเหนี่ยวนำร่วม | 13 |
| อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อการเหนี่ยวนำร่วมกัน | 14 |
| ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน ต่อกันแบบอนุกรม | 15 |
| ตัวเหนี่ยวนำที่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบอนุกรม | 15 |
| ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีอำนาจแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบขนาน | 16 |
| ผลของการเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้า | 16 |
| ผลของการเหนี่ยวนำในวงจร เอ.ซี. | 18 |
| ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า | 18 |
| วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว | 20 |
| กำลังไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว | 23 |

**บทที่ 2.ทฤษฎีการประจุ**

| | |
|---|---|
| การประจุ | 26 |
| ตัวประจุ | 26 |
| วัสดุไดอีเล็ตทริค | 29 |
| หน่วยของการประจุ | 29 |
| อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อค่าของการประจุ | 30 |
| การประจุไฟฟ้าและการจ่ายประจุไฟฟ้าของวงจรอนุกรม R/C | 31 |
| เวลาคงตัวของ RC | 33 |
| แผนภูมิเวลาคงที่สากล | 35 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประจุต่อแบบขนาน และแบบอนุกรม 38
ชนิดของตัวประจุ 40
อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุ 44
วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 45
กำลังไฟฟ้าที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว 48

**บทที่ 3.วงจรออสซิลเลเตอร์**

หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์ 50
วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น 52

**บทที่ 4.หลักการออกแบบ**

วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ 54
วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล 55
วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก 55
หลักการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล 56
หลักการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก 58
วงจรเฟสล็อกลูปและวงจรเปรียบเทียบความต่างเฟส 59
วงจรโวลท์เดจคอนโทรลออสซิลเลเตอร์ 62

**บทที่ 5.การทดลองและผลการทดลอง**

วิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุด้วยความถี่รีโซแนนซ์ 65
การทำงานของวงจรเครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์ 67
ผลการทดลอง 70

**ภาคผนวก**

**กิตติกรรมประกาศ**

**หนังสืออ้างอิง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทนำ

เครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆมากมาย ตัวอย่างเช่นใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิในคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ในการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เช่นระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัต ซึ่งจะมีการชดเชยการเผาไหม้ของระบบ

สำหรับโครงงานนี้ ได้นำเอาหลักการพื้นฐานของความถี่รีโซแนนซ์ ของวงจร RLC ออสซิลเลเตอร์ ทำการหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ และได้ใช้โปรแกรมภาษา C ทำการประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วๆไปที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย

ข้อได้เปรียบของโครงงานนี้คือ สามารถวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง และค่าความผิดพลาดในการวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

ผู้จัดทำหวังว่าโครงงานเล็กๆ นี้จะให้ความรู้แก่ผู้ที่สนใจเพื่อที่ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ

## การเหนี่ยวนำ (Inductance)

การเหนี่ยวนำ เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ที่จะพยายามขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร นั่นคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวภายในตัว (Self-Induced Voltace) ต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงนี้จึงทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้าๆ และถ้ากระแสไฟฟ้าลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจะช่วยเสริมหรือช่วยขยายเวลาในการไหลของกระแสไฟฟ้าออกไป จึงทำให้การลดของกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่างช้าๆ ดั้งนั้น ผลที่สังเกตเห็นได้อย่างง่ายๆ ของการเหนี่ยวนำ คือกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างรวดเร็วเหมือนกับในวงจรที่ไม่มีการเหนี่ยวนำ (Noninductive Circuit)

การขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เป็นผลอย่างหนึ่งของการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้าได้เมื่อตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก หรือให้เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับตัวนำไฟฟ้า นั่นคือ (เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ (Relative Notion) ขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็ก และตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้านหนี่ยวนำภายในตัวขึ้นในตัวนำไฟฟ้า

## การเหนี่ยวนำภายในตัว (Self Inductance)

ถึงแม้ว่าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวเป็นเส้นตรงอย่างเดียว ก็จะมีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นได้บ้าง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ถ้านำไฟฟ้าตลอดทั้งความยาวของมัน เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงค่าไป สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เป็นผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว" (Self Induced e.m.f.) ทั้งนี้เพราะว่ามันถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรกำลังเพิ่มขึ้น ฟลั๊ก(Flux) ที่คล้องกับ (Linking With) วงจรก็จะค่อยๆ เพิ่มตามไปด้วย ฟลั๊กที่กำลังเพิ่มขึ้นนี้ จะตัดกับตัวนำไฟฟ้าและทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ โดยมีทิศทางขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าและฟลั๊ก ในทำนองเดียวกัน เมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังลดลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางข้ามกันกับในตอนแรก และจะขัดขวางต่อการลดของกระแสไฟฟ้า ผลที่เกิดขึ้นนี้ ได้สรุป

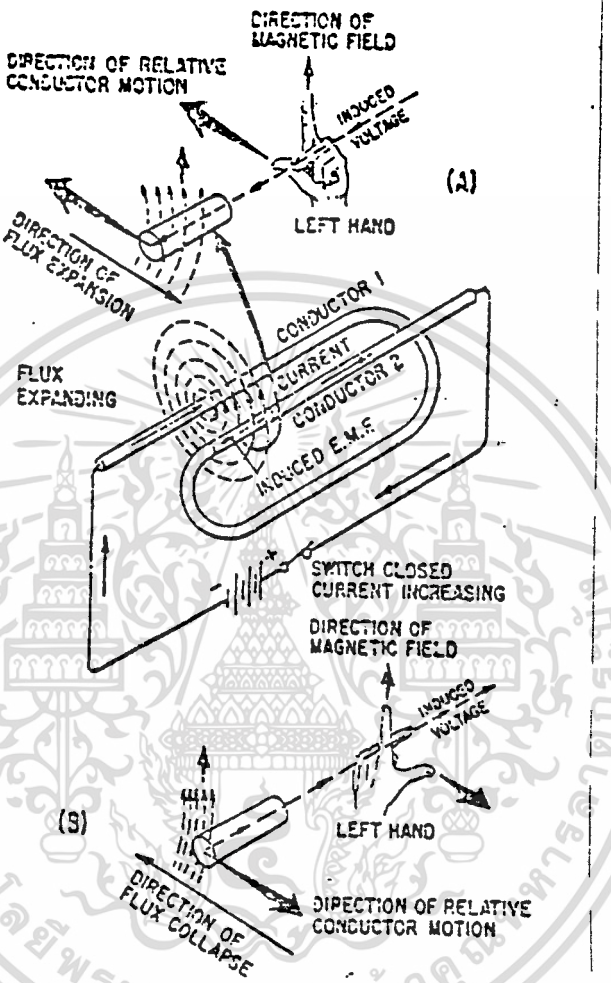
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ในกฎของเลนซ์ (Lenz's Lak) ซึ่งกฎนี้ได้กล่าวไว้ว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรใด ๆ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับผลที่ทำให้เกิดเสมอ"

การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้าที่นำมาพันเป็นขดลวด จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แต่ละส่วนของตัวนำ ตัดกับตัวนำส่วนอื่นๆ ของขดลวด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1-1 (A) ความยาวของตัวนำจะถูกขดให้เป็นวง จึงทำให้ส่วนทั้งสองของตัวนำวางใกล้กันและขนานกัน ส่วนเหล่านี้ใช้แทนตัวนำไฟฟ้า 1 และตัวนำไฟฟ้า 2 เมื่อสับสวิทช์ลงไป หรือปิดสวิทช์ อิเลคตรอนจะไหลผ่านตัวนำ จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบทุกๆส่วนของตัวนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกจึงได้แสดงให้เห็นสนามแม่เหล็กเพียงส่วนเดียว เกิดขึ้นตั้งฉากตัวนำไฟฟ้าทั้งสอง ถึงแม้ว่าสนามแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในตัวนำทั้งสองพร้อมๆ กัน แต่จะพิจารณาส่วนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า 1 และผลที่มีต่อตัวนำไฟฟ้า 2 ในขณะที่กระแสไฟฟ้าค่อยๆ เพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กจะขยายตัวออกจากตัวนำไฟฟ้า 1 ตัดกับส่วนของตัวนำไฟฟ้า 2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า 2 แสดงให้เห็นด้วยลูกศรไข่ปลาซึ่งจะเห็นว่ามันมีทิศทางตรงกันข้ามหรือขัดขวางกับกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์

ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ สามารถหาได้โดยการใช้ "กฎมือซ้ายของเครื่องไฟฟ้ากำเนิดไฟฟ้า" (Lelf Hand Rule For Generator) กฎอันนี้จะนำไปใช้กับส่วนหนึ่งตัวนำไฟฟ้า 2 ซึ่งถูกยกขึ้นไปและขยายให้ชัดเจนขึ้นในส่วน (A)ของรูปที่ 1-1 เมื่อใช้กฎนี้ หัวแม่มือของมือซ้ายจะชี้ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็ก (ในกรณีนี้ สนามแม่เหล็กกำลังเคลื่อนที่หรือกำลังขยายตัวออกไปในทิศทางหนึ่ง ซึ่งก็เหมือนกับว่าตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม) นิ้วชี้จะชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก นิ้วกลางที่กางออกตามที่แสดงนั้น จะชี้บอกทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวที่เกิดขึ้น ในส่วน (B) เป็นส่วนเดิมของตัวนำไฟฟ้า 2 แต่เป็นตอนปิดสวิทช์และฟลั๊กยุบตัว เมื่อนำกฎมือซ้ายมาใช้ในกรณีจะเห็นว่า เมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลั๊ก (Flux) เปลี่ยนไปจะทำให้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปด้วย อย่างไรก็ตาม ข้อสำคัญที่ควรสังเกตก็คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งสองครั้ง ซึ่งมันจะหน่วงเหนี่ยวการไหลของกระแสไฟฟ้าในตอนแรก โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนของแบตเตอรี่ และหน่วงเหนี่ยวการลดของกระแสไฟฟ้า โดยทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางไปทางเดียวกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 1-1 การเหนี่ยวนำภายในตัว**

**หน่วยของการเหนี่ยวนำ (Unit of Inductance)**

หน่วยที่ใช้วัดค่าการเหนี่ยวนำ L คือ เฮนรี่ (Henry) ซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ด้วยอัตรา 1 แอมป์ต่อวินาที แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวขึ้น 1 โวลท์ ตัวเหนี่ยวนำนี้ จะมีค่าการเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การเหนี่ยวนำ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาแสดงให้เห็นโดยทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

$e = Lx$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการเหนี่ยวนำภายในตัว (L) = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ/ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

หรือ $e = L\ di/dt$

เมื่อ e แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโวลท์

L ค่าการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ ,h

di อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์ในเวลา dt วินาที

(d เป็นสัญญลักษณ์ที่หมายถึง "การเปลี่ยนใน_____")

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday 'Law) เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ได้สรุปความจริงที่เกิดขึ้นไว้ 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 กล่าวว่า " เมื่อสนามแม่เหล็กที่คล้องกับวงจรเปลี่ยนแปลงค่าไป จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวไฟฟ้าเสมอ" หรือ

"เมื่อตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวไฟฟ้าเสมอ"

กฎข้อที่ 2 กล่าวไว้ว่า "จำนวนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก"

จากกฎข้อที่ 2 ของฟาราเดย์ แสดงให้เห็นโดยทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้คือ

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ=อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนสนามแม่เหล็กที่คล้องกับวงจร

หรือ $e = d\phi/dt$ 1-2

เมื่อ e แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นโวลท์

$d\phi$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊ก (Flux) เป็นเวเบอร์ในเวลา dt วินาที จากสมการ 1-1 จะได้

$L$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ / อัตราเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

$L = e / di/dt$

เมื่อนำสมการ 1-2 แทนค่า e จะได้

$L = d\phi/dt \ / \ di/dt$

นั่นคือ

จำนวนเฮนรี่ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก/ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

เพราะฉะนั้น $L = \phi/t \ / \ I/t$

$= \phi/I$

เมื่อ $\phi$ สนามแม่เหล็ก(Flux) เป็นเวเบอร์(wb)

I กระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

เฮนรี่ = เวเบอร์ / แอมแปร์

เฮนรี่(Henry) เป็นหน่วยใหญ่ที่ใช้วัดค่าการเหนี่ยวนำ(Inductance) ของตัวเหนี่ยวนำ(Inductor) ขนาดใหญ่ หน่วยเล็กๆ ลงไปใช้เป็นมิลลิเฮนรี่ (Millihenry) mH และไมโครเฮนรี่ (Microhenry) μH

**อิทธิพลของตัวประกอบที่มีค่าต่อการเหนี่ยวนำภายในตัว**

**(Factors Affecting Self Inductance)**

มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำภายในตัวของวงจร ตัวที่สำคัญตัวหนึ่ง คือ จำนวนของการคล้องระหว่างตัวนำไฟฟ้าทั้งหลายของวงจรกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของมัน ในตัวนำไฟฟ้าที่เป็นเส้นตรง จะมีการคล้องของสนามแม่เหล็กระหว่างส่วนหนึ่งของตัวนำไฟฟ้า กับส่วนอื่นๆ นั้นน้อยมากดั้งนั้นการเหนี่ยวนำของมันจึงมีค่าน้อยตัวนำไฟฟ้าจะมีการนำมากเมื่อนำมาพันเป็นขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 1-2 เพราะว่าการคล้องของสนามแม่เหล็ก ระหว่างตัวนำไฟฟ้าของรอบที่อยู่ประชิดกันในขดลวดจะคล้องได้มากที่สุด

รูปลักษณะของขดลวดก็จะมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวด ในรูปที่ 1-2 (A) เป็นตัวเหนี่ยวนำ อย่างเลวเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆ เพราะว่ารอบของมันมีช่วงห่างมาก ดั้งนั้นจำนวนฟลั๊กที่คล้องระหว่างขดลวดจะลดลง การเคลื่อนที่ของฟลั๊กที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งแสดงโดยลูกศรไข่ปลา จะไม่คล้องตัวมันด้วย เพราะมีขดลวดเพียงชั้นเดียว ขดลวดที่มีการเหนี่ยวนำมากอันหนึ่ง แสดงให้เห็นในรูป (B) จำนวนรอบทั้งหมดจะอยู่ชิดกันมาก และฟลั๊กทั้งสองชั้นนี้จะคล้องซึ่งกันและกันด้วยจำนวนของฟลั๊กเป็นจำนวนมากทั้งระหว่างการเคลื่อนที่ของฟลั๊กข้างเคียงทั้งหมดด้วย จะเห็นว่ารอบที่อยู่ใกล้ๆ กันทั้งหมด เช่น (a) จะอยู่ประชิดกันรอบอื่นถึง 4 รอบ (แรเงา) ดั้งนั้นมันจึงสามารถเพิ่มจำนวนฟลั๊กที่คล้องให้มากขึ้นได้

ขดขวดที่มีการเหนี่ยวนำมากขึ้นไปอีกนั้น จะพันเป็น 3 ชั้น และมีแกนที่มีความแทรกซึมสูง ดังรูปที่ 1-2(c) การเพิ่มจำนวนชั้น (พื้นที่หน้าตัด) จะทำให้การคล้องฟลั๊กข้างเคียงดีขึ้น จะเห็นว่าในบางรอบเช่น (b) จะอยู่ประชิดกันกับรอบอื่นถึง 6 รอบ (แรเงา) คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กจะทำให้จำนวนสฟลั๊กของขดลวดเพิ่มขึ้นเป็นหลายๆ เท่า ของขดลวดแกนอากาศ ที่มีจำนวนรอบเท่าๆ กัน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนี้จะเห็นว่า ตัวประกอบเบื้องต้นในการบังคับการเหนี่ยวนำของขดลวด คือ (1) จำนวนรอบของขดลวดตัวนำไฟฟ้า (2) อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของขดลวดต่อความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ (3) ความแทรกซึมของวัสดุที่ใช้เป็นแกน จำนวนกระแสไฟฟ้าจะมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวดที่แกนของมันเป็นสารแม่เหล็ก และเมื่อแกนของมันเป็นอากาศ การเหนี่ยวนำของมันจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า

สูตรต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำควณหาค่าการเหนี่ยวนำ ภายในตัวเหนี่ยวนำนั้นสำหรับขดลวดตัวนำไฟฟ้าชั้นเดียว ซึ่งมีความยาวเป็น 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือมากกว่าจะใช้สูตรดังนั้นคือ

$$L = 0.4\pi\mu N^2 A / 10^8 l \qquad 1\text{-}4$$

เมื่อ L เป็นการเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี่(Henry) N เป็นจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด $\pi$ เท่ากับ 3.14 $\mu$ เป็นความแทรกซึมของแกน (ถ้าสารที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก $\mu = 1$) A เป็นพื้นที่หน้าตัดขดลวดเป็นตารางเซนติเมตร และ l เป็นความยาวของขดลวดเป็นเซนติเมตร ดั้งนั้นจะเห็นว่าการเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบของมันเพิ่มขึ้น และการเหนี่ยวนำของขดลวดจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่หน้าตัดของมันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปโดยทำให้ขดลวดมีระยะสั้นมากๆ หรือความแทรกซึมของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น การเหนี่ยวนำก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่าง จงหาค่าการเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งยาว 20 ซ.ม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซ.ม. และแกนมีความแทรกซึม 200 มีจำนวนรอบทั้งหมด 200 รอบ
ดั้งนั้น

$$L = 0.4\pi * 200 * 200^2 * 0.785 * 2^2 / 10 * 20 = 0.158 \text{ H}$$

นอกจากสูตรที่แสดงในสมการ (1-4) แล้ว ยังสามารถนำสมการ (1-3) มาพิสูจน์ได้อีกถ้าหากว่าตัวนำไฟฟ้านำมาพันเป็นขดลวดมี N รอบ ดั้งนั้นจากกามการ (1-3) จะได้

$$L = N\phi / I \qquad (1)$$

$$\phi = BA$$

เพราะฉะนั้น $$L = BAN / I \qquad (2)$$

$$B = \mu h$$

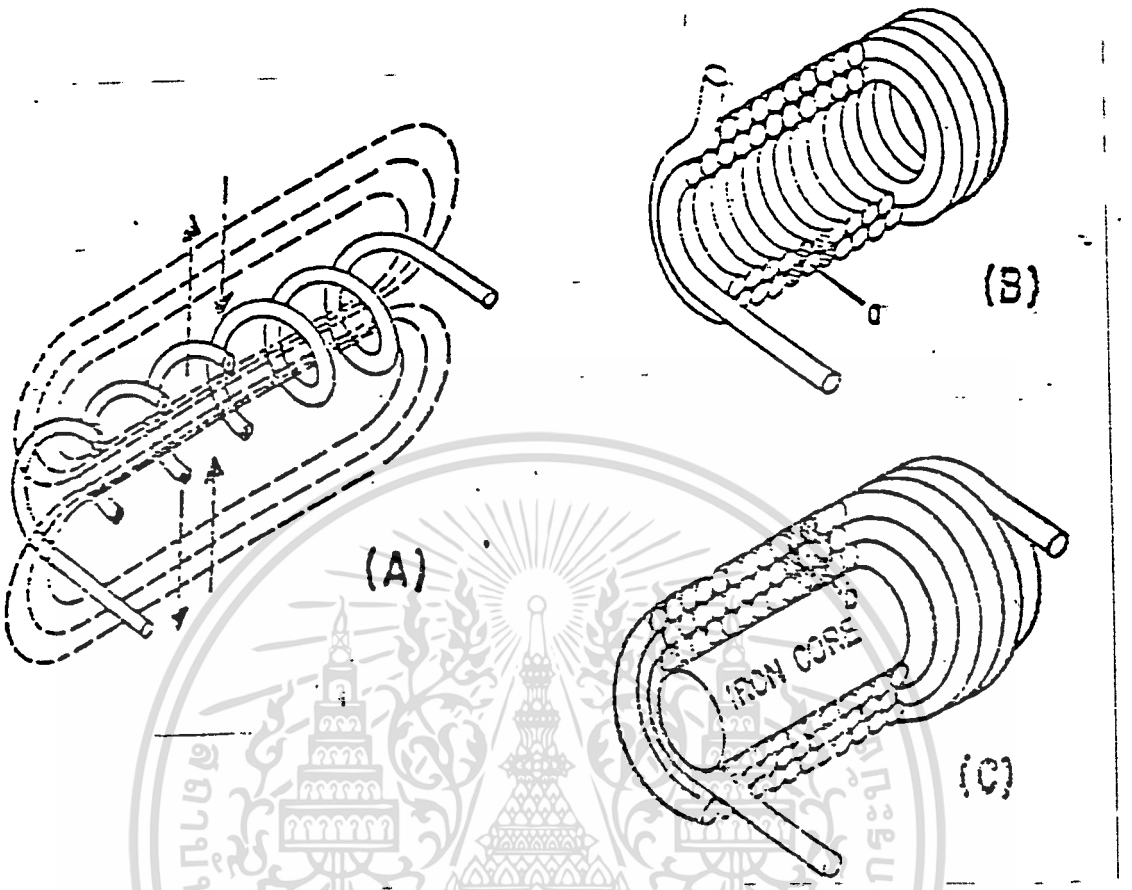
เพราะฉะนั้น $$L = \mu HAN / I \qquad (3)$$

$$H = NI/I$$

เพราะฉะนั้น $$L = \mu AN / I \qquad (1\text{-}5)$$

เมื่อ L การเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ A พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเป็นตารางเมตร N เป็นจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด l ความยาวของขดลวดเป็นเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 1-2 การเหนี่ยวนำของขดลวดต่างๆ

**การเพิ่มและการลดของกระแสไฟฟ้าในวงจรอนุกรม R-L**

**( Growth and Decey of Current in R-L Series Circuit )**

ถ้านำอาการเหนี่ยวนำบริสุทธิ์ (Pure Inductance) ต่อเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจนถึงค่าสูงสุดของมัน ซึ่งหาค่าได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะว่าเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน (Counter emf) ขึ้นโดยการเหนี่ยวนำภายในตัวของขดลวด เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มค้นไหล จะทำให้สนามแม่เหล็กค่อยๆ ขยายตัวออก ตัดกับรอบของขดลวดตัวนำไฟฟ้า จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ การต่อต้านนี้จะทำให้เวลาที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า ถึงค่าสูงสุดของมันล่าช้าออกไป เมื่อปลดแบตเตอรี่ออก สนามแม่เหล็กจะยุบตัวตัดกับขดลวดตัวนำไฟฟ้าให้มากออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรไฟฟ้าวงจรหนึ่งประกอบด้วยความต้านทาน และการเหนี่ยวนำต่อเข้าด้วยกันโดยมีสวิทช์พิเศษ ดังแสดงในรูป 1-3 (A) ซึ่งเป็นการต่อแบบอนุกรม และเรียกว่าวงจรอนุกรม R-L

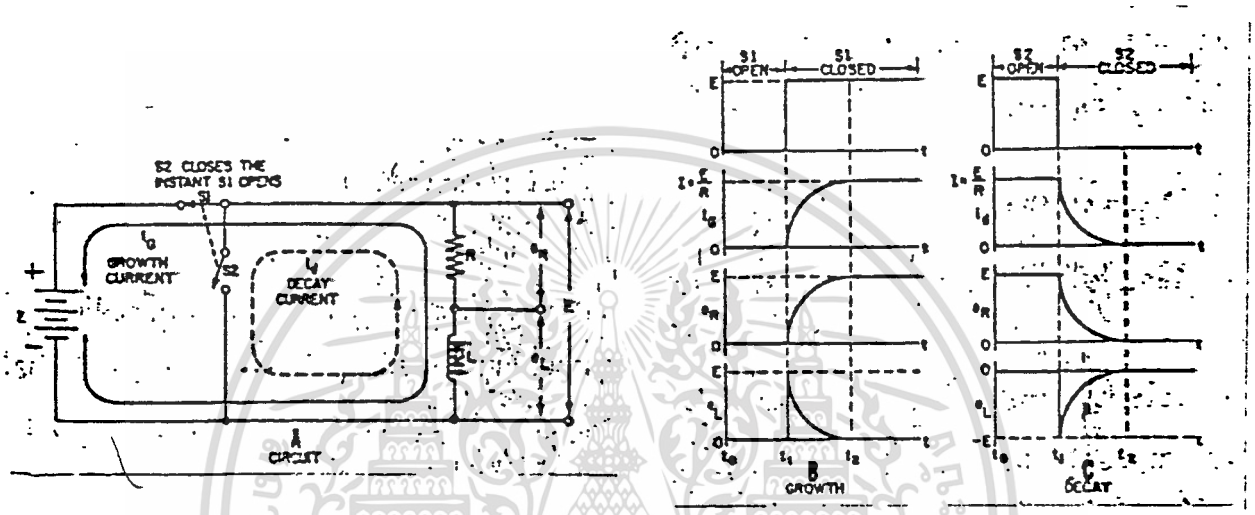
ถ้าปิดสวิทช์ S1 (ดังแสดงในรูปแรงเคลื่อนไฟฟ้า E จะปรากฏอยู่ระหว่างวงจรจึงทำให้กระแสไฟฟ้าพยายามไหล แต่ตัวเหนี่ยวนำจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านไว้ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านนี้จะมีค่าเท่ากับ E ในชั่วขณะตอนเริ่มต้นนั้น กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรไม่ได้ ในกรณีนี้ จึงไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน R ในรูปที่ 1-3 แสดงให้เห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะปรากฏอยู่ระหว่า L และจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าปรากฏอยู่ที่ R ในชั่วขณะที่ปิดสวิทช์ S1

เมื่อกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่านไปได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นที่ R คือ eR และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ที่ L คือ El จะลดลงเป็นจำนวนเท่าๆ กัน เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง L ลดลง นั่นก็หมายความว่า การเพิ่มของกระแสไฟฟ้า ig กำลังเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเหตุนี้ eR ก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 1-3 (B) แสดงให้เห็นว่า El ในตอนสุดท้ายจะเป็นศูนย์ เมื่อ ig ไม่เพิ่มต่อไปอีกซึ่งขณะนี้ Er จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ E เมื่อกระแสไฟฟ้าถึงค่าสูงสุดของมัน ภายใต้สภาพที่คงที่(ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) ตัวต้านทาน (Resistor) จะเป็นตัวจำกัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร

การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical Inductance) ก็เหมือนกับแรงเฉื่อยทางกล (Mechanical Inertia) และการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำ ก็เหมือนกับอัตราเร่งของเรือบนผิวน้ำ เรือเริ่มต้นเคลื่อนที่ใช้ขณะของแรงคงที่อันหนึ่งที่มันได้รับ ในชั่วขณะอัตราเร่งของมันจะสูงมาก และแรงที่มันได้รับทั้งหมดก็จะใช้ เพื่อเอาชนะแรงเฉื่อยของเรือ ภายหลังจากความเร็วของเรือเพิ่มขึ้น (อัตราเร่งของมันจะลดลง)แรงทั้งหมดก็จะนำมาใช้เพื่อเอาชนะความฝืดของน้ำกับตัวเรือ เพื่อความเร็วของเรือได้ระดับอัตราเร่งของมันจะเป็นศูนย์ ที่ความเร็วนี้ แรงที่จ่ายให้จะเท่ากับแรงต้านทานของความฝืดและผลของแรงเฉื่อยก็จะหมดไป

ขณะที่ปิดสวิทช์ของแบตเตอรี่ในวงจรอนุกรม R-L ในรูปที่1-3(A) อัตราการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าในวงจรเหนี่ยวนำจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งในขณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทั้งหมดโดยจะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำภายในตัว ซึ่งเกิดขึ้นมากที่สุด เพราะว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเท่ากับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตังเหนี่ยวนำ ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทาน จะเป็นศูนย์ เมื่อระยะเวลานานขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ส่วนมากจะไปปรากฏอยู่ที่ตัวต้านทาน และปรากฏระหว่างตัวเหนี่ยวนำน้อยลงไป เมื่ออัตราการเปลี่ยนของกระแสไฟฟ้ามีน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นน้อยด้วยและเมื่ออัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าคงที่แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกระหว่างตัวเหนี่ยวนำจะเป็นศูนย์แรงเคลื่อนจากแบตเตอรี่ทั้งหมด จะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะความต้านทานของวงจรเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 1.3 การเพิ่มและการลดของกระแสอนุกรมไฟฟ้าในวงจร**

ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน จะเปลี่ยนค่าไปใช้ในระหว่างช่วงเวลาการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเหมือนกับแรงที่ใช้กับเรือ ซึ่งจะแยกตัวมันเองเป็นแรงเฉื่อย และผลของความฝืด ในตัวอย่างทั้งสองนี้ จะเห็นว่าแรงที่ใช้ไปในตอนแรกนั้น เพื่อเอาชนะแรงเฉื่อยจากผลของการเหนี่ยวนำและในตอนสุดท้าย เพื่อเอาชนะความฝืดจากผลของความต้านทานในวงจร

ถ้าปิดสวิทช์ S2 (ปลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดออกไปจากวงจร) สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นรอบๆ L ยุบตัวตัดกับขดลวด ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ eL ใน L ซึ่งมีขั้วตรงกันข้ามกับ E และมีขนาดเท่ากันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ eL จะเป็นเหตุทำให้กระแสไฟฟ้า id ไหลผ่าน R ในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเมื่อตอนปิดสวิทช์ S1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า eR ซึ่งเกิดขึ้นระหว่าง R ในตอนแรกนั้นมีค่าเท่ากับ E มันจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการยุบตัวของฟลั๊ก eL ระหว่าง L ลดลงเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เวลาคงที่ L /R (Time Constant)**

เวลาที่ต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านดังเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นถึง 63% (ที่จริง 63.2%) ของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด หรือลดลงถึง 37% (ที่จริง 36.8% ) ของค่าต่ำสุด เรียกว่า "เวลาคงที่" ของวงจรการรับและการจ่ายกระแสไฟฟ้าของวงจร R-L แสดงให้เห็นโดยยกกราฟ รูปที่ 1-4 ค่าเวลาคงที่เป็นวินาทีจะเท่ากับการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ หารด้วยความต้านทานของวงจรเป็นโอห์ม ซึ่งค่าต่างๆ แสดงไว้ในกราฟ รูปที่ 1-4 L/R เป็นสัญญลักษณ์ที่นำมาใช้สำหรับค่าเวลาคงที่ในที่นี้

ความสัมพันธ์ ของทั้งสองตัวที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่ง L/R เวลาคงที่จะเป็นไปตามนี้ คือ

L (เป็นเฮนรี่) / R( เป็น โอห์ม) = t (เป็นไมโครวินาที)

L (เป็นไมโครเฮนรี่) / R( เป็นโอห์ม ) = t (เป็นไมโครวินาที)

เวลาคงที่ (Time Constant) อาจจะกำหนดเป็นเวลาที่ต้องการสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในการเพิ่มหรือการลดถึงค่าตอนสุดท้ายของมัน เมื่อการเพิ่มหรือการลดมีต่อเนื่องกันไปตามอัตราตอนแรก ซึ่งจะเห็นได้ในรูปที่ 1-4 (B) ความเอียงของเส้นสัมผัสเส้นไขปลา OX แสดงให้เห็นถึงอัตราตอนแรกของการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ด้วยอัตรานี้ กระแสไฟฟ้าจะถึงค่าสูงสุดของมันในเวลา L/R วินาที ในทำนองเดียวกัน ความเอียงของเส้นสัมผัส เส้นไข่ปลา YZ แสดงอัตราตอนแรกของการลดของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา และการลดจะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ในเวลา L/R วินาที

สมการของการเพิ่มขอวกระแสไฟฟ้า iL ผ่าน L คือ

$$iL = E / R + ( 1 - 1 / RT/ (2.718) L \qquad (1\text{-}6)$$

เมื่อ iL กระแสไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneouse current) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร (ในกรณีนี้มีค่า 100 โวลท์) R ความต้านทาน เป็นโอห์ม t เป็นวินาที และ L ค่าการเหนี่ยวนำเป็นเฮนรี่ ในรูปที่ 1-4 (B) เป็นกราฟของสมการนี้

เมื่อ t = L/R เลขกำลัง (Exponent) Rt/L ในสมการ (1-6) จะลดลงเป็น 1 เพราะฉะนั้น 1/2.718 = 0.368 ดังนั้น

iL = E/R (1 - 0.368) = 0.632 E/R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

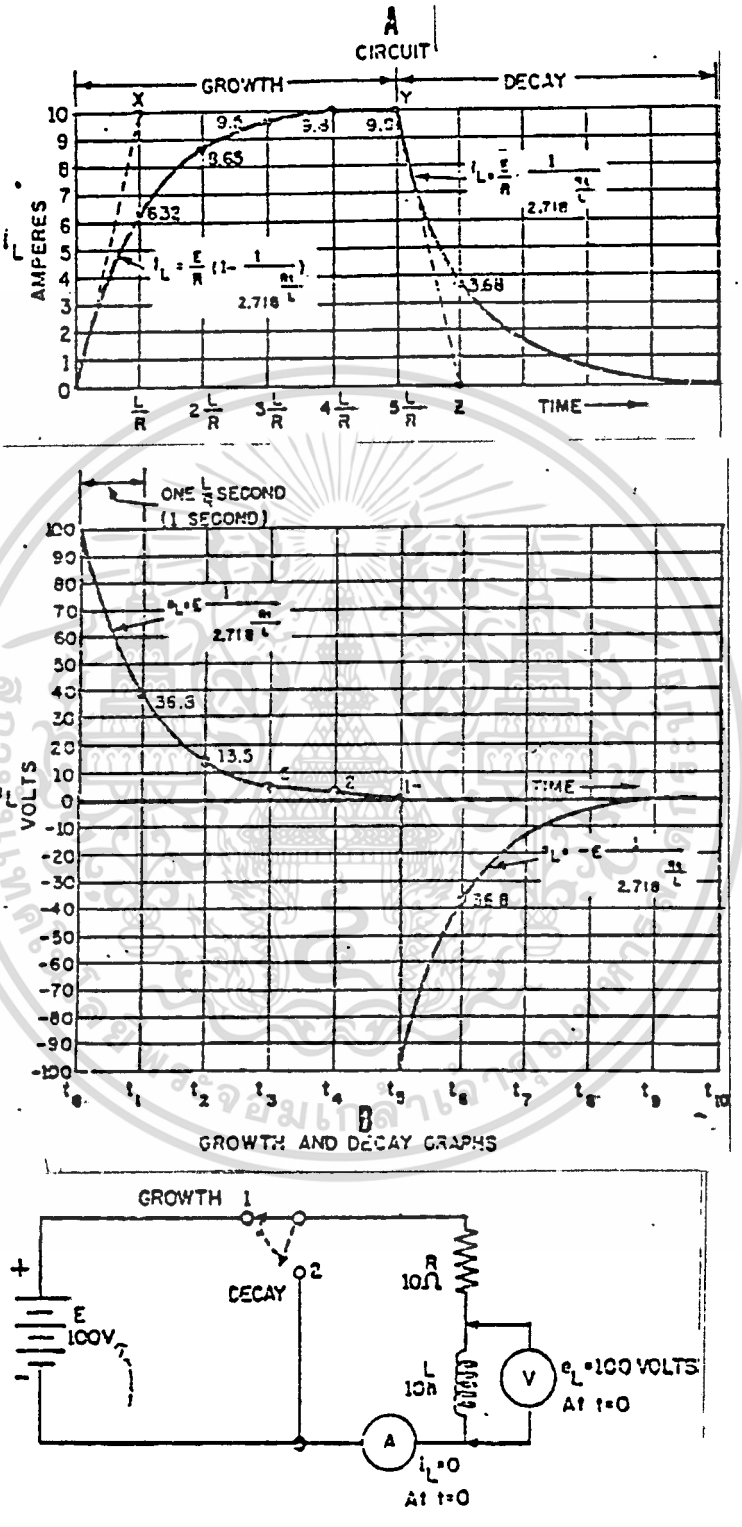
หรืออาจจำกล่าวได้ว่า เมื่อ t = L/R , iL จะเท่ากับ 63.2% ของอัตราส่วน E/R ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเป็น 10 แอมแปร์ (E =10 และ R =10 กระแสไฟฟ้าผ่าน L จะเพิ่มถึง 6.32 แอมแปร์ ในเวลา L/R = 10/10 หรือ 1 วินาที

สมการสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ El จะเป็นไปตามการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า คือ

$$cL = E\ (1 / Rt/2.718)\ L \qquad (1\text{-}7)$$

กร๊าฟของสมการนี้ได้แสดงในรูปที่ 1-4 (B) ด้วย เมื่อ t = L/R, cL = 0.368 E นั่นคือ cL = 0.368 x 100 = 36.8 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 1-4 เวลาคงที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)**

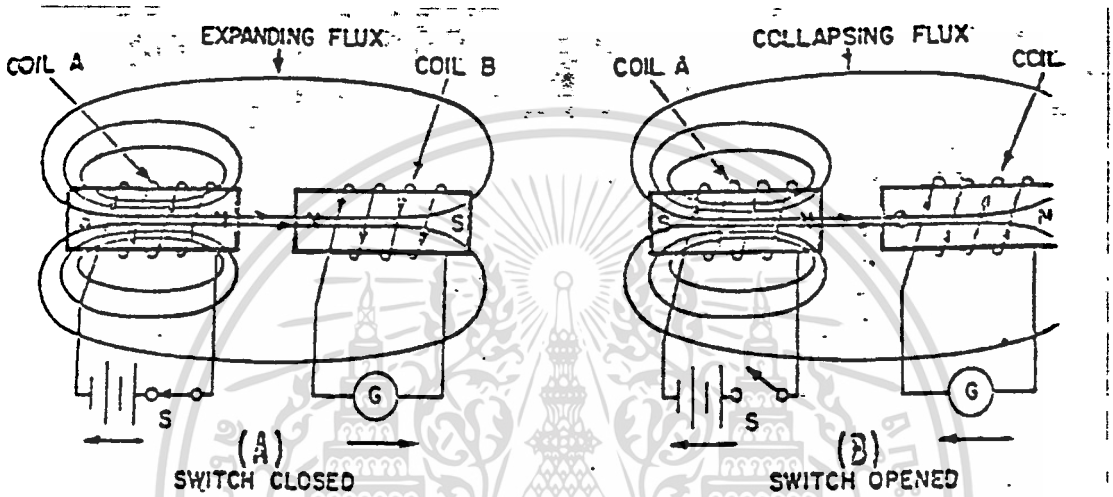
เมื่อขดลวดสองชุดนำมาวางใกล้ ๆ กัน โดยทำให้ปลั๊กของขดลวดชุดที่หนึ่งคล้องกับรอบทั้งหมดของขดลวดชุดที่สอง ถ้าปลั๊กในขดลวดชุดที่หนึ่งเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดชุดที่สอง นี้แสดงว่าขดลวดทั้งสองชุดมีการเหนี่ยวนำร่วมกัน (Mutual Inductance) จำนวนของการเหนี่ยวนำร่วมกันนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขดลวดทั้งสองชุด ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางห่างกันมาก ฟลั๊ก (Flux) ที่คล้องกับขดลวดทั้งสองจะมีค่าน้อย การเหนี่ยวนำร่วมกันก็จะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางใกล้กันมากหรือทับกัน จำนวนสนามแม่เหล็กทั้งหมดของขดลวดหนึ่งสามารถคล้องจำนวนรอบของชุดที่สองได้หมด จะทำให้การเหนี่ยวนำร่วมกันมีค่าสูง และการเหนี่ยวนำร่วมกันจะมีค่าสูงมากขึ้น ถ้าขดลวดทั้งสองพันรอบแกนเหล็กอันเดียวกัน

เมื่อขดลวดทั้งสองชุดนำมาวางใกล้ๆ กัน โดยแกนของมันอยู่ในแนวเดียงกัน ดังรูปที่ 1-5 ขดลวดชุด A ต่อเข้ากับแบตเตอรี่โดยมีสวิทช์ S ต่ออยู่ด้วย และขดลวดชุด B ต่อเข้ากับแกลวานอมิเตอร์ (Gavanometer) G เมื่อเป็นสวิทช์ S (รูปที่ 1-5 (A) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดชุด A จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และจะไปคล้องกับขดลวดชุด B เป็นเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและไหลผ่านแกลวานอมิเตอร์ จึงทำให้เข็มของมันเบนไป เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดชุด A ถึงค่าคงที่ของมัน เข็มของแกลวายอมิเตอร์ไปอยู่ศูนย์ และเมื่อต่อสวิทช์ (รูปที่ (1-5 B) เข็มของแกลวานอมิเตอร์จะเป็นไปอีกทิศทางหนึ่ง นั่นแสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด B และมีทิศทางตรงกันข้ามกับในตอนแรก การไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด B นี้ เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด B ซึ่งเกิดขึ้นจากฟลั๊กในขดลวด A ขยายตัวและขุบตัวตัดกับขดลวด B

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด A ฟลั๊กที่เกิดขึ้นในขดลวด A จะมีขั้วเหนือใกล้ๆ กับขดลวด B ฟลั๊กบางส่วนจะกระจายจากทางซ้ายไปทางขวา ตัดกับจำนวนของขดลวด B ซึ่งฟลั๊กจำนวรนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าในขดลวดชุด B มีทิศทางขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าและฟลั๊กในขดลวดชุด A ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในขดลวดชุด B จึงพยายามสร้างขั้วเหนือขึ้นใกล้ๆ กับขดลวดชุด A ( ขั้วชนิดเดียวกันผลักกัน )

เมื่อเปิดสวิทช์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดชุด A จะยุบตัวของสนามแม่เหล็กจะตัดกับขดลวดชุด B ในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนปิดสวิทช์ จึงทำให้เกิดขั้วใกล้ๆ กับขดลวดชุด B (ขั้วต่างชนิดกันจะดูดกัน) ขั้วแม่เหล็กนี้จะช่วยเพิ่มอำนาจแม่เหล็กให้ขดลวดชุด A ซึ่งพยายามป้องกันการยุบตัวของสนามแม่เหล็กของมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 1-5 การเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน

**อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อการเหนี่ยวนำร่วมกัน**

**( Factors affecting mutual Inductance )**

การเหนี่ยวนำร่วมกันของขดลวดทั้งสองชุดที่อยู่ใกล้กันจะขึ้นอยู่กับ (1) ขนาดของรูปร่างของขดลวดทั้งสองชุด (2) จำนวนรอบของขดลวดแต่ละชุด (3) ระยะห่างของขดลวดทั้งสอง (4) ตำแหน่งแนวแกนขดลวดทั้งสองชุด และ (5) ความแทรกซึมของแกน

ถ้าขดลวดทั้งสองวางไว้ในตำแหน่งที่ฟลั๊กทั้งหมดของขดลวดชุดที่ 1 ตัดกับจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดชุดที่ 2 ค่าการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันหาได้จาก

$$M = 0.4\,\pi\mu A N_1 N_2 / 10^8 l \qquad (1\text{-}8)$$

เมื่อ M การเหนี่ยวนำร่วมกันของขดลวดทั้งสองชุดเป็นเฮนรี่, N1 และ N2 เป็นจำนวนรอบของขดลวดของชุดที่ 1 และที่ 2, A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเป็นตารางเซนติเมตร $\mu$ เป็นความแทรกซึมของแกนและ 1 เป็นความยาวของแกนเป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าขดลวดทั้งสองชุดวางไว้ให้ชิดกันมากจนกระทั่งสนามแม่เหล็กชุดที่ 1 ตัดกับขดลวดชุดที่ 2 ได้ทั้งหมดแล้ว ขดลวดทั้งสองชุดนี้จะมี "สัมประสิทธิ์ของการร่วมเป็นหนึ่ง" (Unity coefficient of Coupling) ถ้าจำนวนฟลั๊กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1 ทั้งหมดตัดกับขดลวดชุดที่ 2 ได้เพียงครึ่งเดียว สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันจะเป็น 0.5 สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันใช้แทนด้วย K สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันจะเท่ากับจำนวนร้อยละ ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในขดลวดชุดหนึ่ง ที่ตัดกับขดลวดชุดอื่น ตามปกติแล้วค่าจะมีค่าไม่ถึง 1 แต่มันจะใกล้เคียงค่าหนึ่งมากที่สุดในแกนหม้อแปลงแบบเซลล์

การเหนี่ยวนำร่วมกันระหว่างขดลวดสองชุด คือ L1 และ L2 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชุด และสัมประสิทธิของการร่วมกัน K ได้ดังนี้

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} \qquad (1\text{-}9)$$

เมื่อ M เป็นหน่วยเดียวกันกับการเหนี่ยวนำของ L1 และ L2

## ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มีสนามแม่เหล็กร่วม ต่อกันแบบอนุกรม

**( Series Inductors Without Magnetic Coupling )**

เมื่อตัวเหนี่ยวนำถูกป้องกันไว้อย่างดี หรือวางให้ห่างมากพอ ที่จะไม่ทำให้เกิดผลทางการเหนี่ยวร่วมกัน การ เหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะรวมเข้าด้วยกันเหมือนกับความต้านทานของตัวต้านทาน นั่นคือ

$$L_t = L1 + L2 + L3 + \ldots Ln \qquad (1\text{-}10)$$

เมื่อ $L_t$ เป็นค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด L1,L2,L3 และ Ln หมายถึงจำนวนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ทั้งหมด

## ตัวเหนี่ยวนำที่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบอนุกรม

**( Serice Inductors With Magnetic Coupling )**

ตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน และได้จัดวางให้สนามแม่เหล็กจากตัวที่หนึ่งไปคล้องกับตัวที่สอง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำร่วมกันขึ้น ซึ่งค่าเหนี่ยวนำทั้งหมดหาได้จาก

$$L_t = L1 + L2 + 2M \qquad (1\text{-}11)$$

เมื่อ $L_t$ เป็นค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด L1,L2 เป็นค่าการเหนี่ยวนำภายในตัวของ L1 และ L2 ตามลำดับ และ M เป็นค่าการเหนี่ยวนำร่วมกันระหว่างตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง เครื่องหมายบวก จะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ M เมื่อแรงเคลื่องแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำทั้งสองเสริมกัน และเครื่องหมายลบจะใช้เมื่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กลบล้างกัน ตัวประกอบ 2 ที่ใส่เข้าไปเป็นอิทธิพลของ L1 ต่อ L2 และ L2 ต่อ L1

ถ้าขดลวดถูกจัดให้ชุดหนึ่งหมุนไปได้ จะทำให้สัมประสิทธิ์ของการร่วมกันเปลี่ยนแปลงไป ค่าการเหนี่ยวนำของขดลวดทั้งสองชุดจะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการเหนี่ยวนำร่วมทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปเท่ากับ 4 M

**ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่มี อำนาจแม่เหล็กร่วมกัน ต่อแบบขนาน**

**( Parallel Inductors Without Magnetic Coupling )**

ค่าการเหนี่ยวนำทั้งหมด Lt ของตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกัน หาได้โดยการคำนวณเหมือนกับความต้านทานของตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน ดังนั้น

$$1/Lt = 1/L1 + 1/L2 + 1/L3 + \ldots\ldots + 1/Ln \qquad (1\text{-}12)$$

เมื่อ L1 , L2 และ L3 เป็นค่าการเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ L1,L2,L3 และ Ln หมายถึงจำนวนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ทั้งหมด

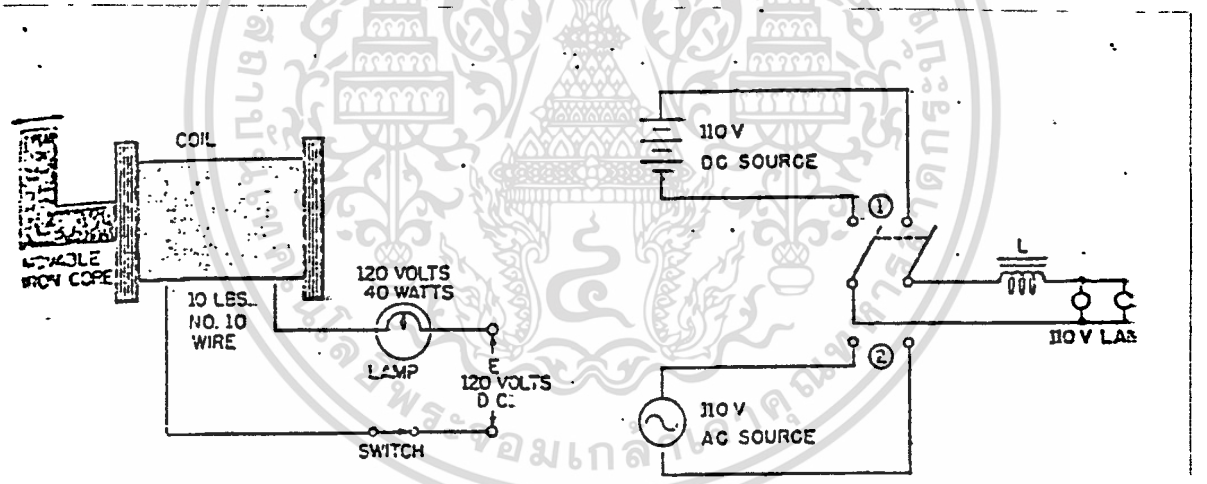
**ผลของการเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้า**

**( Effects Of Inductance in an Electric Circuit )**

ปฏิกิริยาของตัวเหนี่ยวนำต่อการเปลี่ยนของฟลั๊ก (Reaction of Inductor to Flux change) ตราบจนกระทั่งถึงตอนนี้ ได้พิจารณาแล้วว่า ตัวเหนี่ยวนำชนิดพิเศษ จะควบคุมผลของการเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้าในแต่ละกรณี เช่น เวลาที่ต้องการในการหรือลดกระแสไฟฟ้าในวงจรดังรูปที่ 1-3 จะพิจารณาถึงคุณสมบัติภายในของตัวเหนี่ยวนำ L กล่าวคือ อัตราส่วนของการเหนี่ยวนำของมันต่อความต้านทานของมันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภายใน หรืออัตราตามธรรมชาติ รูปร่างของเส้นโค้ง L/R ของตัวเหนี่ยวนำชนิดพิเศษ จะมีลักษณะเหมือนเดิม นั่นคือ มันแสดงการขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและฟลั๊กตามธรรมชาติแบบเดิมของมัน อย่างไรก็ตาม ในตอนนี้จะชี้ให้เห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงความต้านทานของมันออกมาได้หลายขั้น ซึ่งกรณีนี้จะทำได้โดยใช้อำนาจภายนอก ไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กที่คล้องตัวเหนี่ยวนำ การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่จ่ายให้ ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นในอัตราที่พร้อมกับอัตราภายในของตัวเหนี่ยวนำ เมื่ออำนาจภายนอกมาทำให้การเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กเป็นไปอย่างรวดเร็ว ความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่ามากกว่าที่ฟลั๊กเปลี่ยนแปลงไปอย่าช้าๆ นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราของเวลาที่ฟลั๊กคล้องมันเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กซ์ เทียบกับเวลาซึ่งแสดงให้เห็นโดยอาศัยเครื่องมืออย่างง่ายๆ ดังรูปที่ 1-6 เมื่อปิดสวิทช์ กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และหลอดไฟฟ้าจะสว่างไปตามปกติของมัน ถ้านำแกนเหล็กใส่เข้าไปภายในขดลวดอย่างรวดเร็ว ฟลั๊กซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (เพราะว่าเพิ่มการเหนี่ยวนำให้กับขดลวด) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขัดขวางกับแรงเคลื่อนของแหล่งกำเนิด ซึ่งไปตามกฎของเลนซ์ ดังนั้น จึงทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านไหลผ่านหลอดไฟฟ้าได้น้อยลง และมันจะหรี่ลงชั่วขณะหนึ่ง ถ้าถึงแกนเหล็กออกจากขดลวดอย่างรวดเร็ว ฟลั๊กซ์บางส่วนที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดจะยุบตัวตัดกับขดลวด ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะพยายามขัดขวางต่อการลดของฟลั๊กซ์ (เป็นไปตามกฎของเลนซ์) ซึ่งมันจะมีทิศทางเสริมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด กระแสไฟฟ้าในขดลวดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้หลอดไฟฟ้าสว่างขึ้นชั่วขณะหนึ่ง ถ้าการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กยิ่งเร็วมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กซ์ต่อหน่วยเวลา ก็ยิ่งมากขึ้น และผลของหลอดก็ยิ่งจะปรากฏชัดมากขึ้น




รูป 1-6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัว รูป 1-7 ผลของการเหนี่ยวนำในวงจร D.C. และ A.C. ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลของการเหนี่ยวนำในวงจร เอ.ซี.**

**( Effects of Inductance In an A-C circuit )**

เมื่อวงจรที่ประกอบด้วยขดลวดได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสตรง ผลของขดลวดที่มีต่อวงจรจะปรากฏขึ้นเฉพาะในตอนที่วงจรได้รับแรงกระตุ้น หรือในตอนปลดแรงกระตุ้นออกเท่านั้น เช่น เมื่อสวิทช์ ในรูปที่ 1-7 อยู่ที่ตำแหน่ง (1) การเหนี่ยวนำของขดลวด L จะเป็นเหตุให้หลอดสว่างช้าไป หลังจากที่หลอดไฟฟ้าสว่างเต็มที่ตามปกติของมันแล้ว การเหนี่ยวนำก็จะไม่มีผลอะไรต่อวงจรตราบเท่าที่สวิทช์ยังปิดอยู่ เมื่อเปิดสวิทช์ จะมีประกายไฟฟ้า (Electric Spark) เกิดขึ้นระหว่างปุ่มสัมผัสของสวิทช์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประกายไฟ (Spark) นั้น เนื่องมาจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กตัดกับขดลวดของตัวนำไฟฟ้า

เมื่อวงจรการเหนี่ยวนำได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) ผลของตัวเหนี่ยวนำจะมีต่อเนื่องไปในวงจร และจะมีค่ามากกว่าเมื่อได้รับแรงกระตุ้นจากไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรมีค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าน้อยกว่าไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้จากวงจรของรูปที่ 1-7 เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลในขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับ (Alternating magnetic Field) ขึ้นพร้อมๆ กัน ขดลวดสนามแม่เหล็กสลับนี้ และจะตัดกับรอบทั้งหลายของขดลวด กิริยาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้ จะขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมอ เมื่อสวิทช์อยู่ที่ตำแหน่ง (1) หลอดไฟฟ้าจะมีความสว่างเนื่องมาจากกระแสตรงแต่เมื่อสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่งที่ (2) แม้ว่าค่าที่วัดได้ ( Effective Valve ) แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้จะมีค่าเท่ากับของไฟฟ้ากระแสตรง หลอกไฟก็จะหรี่ เพราะการขัดขวางที่เกิดขึ้นระหว่างการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้เป็นส่วนมากจะไปปรากฏอยู่ที่ L จะเหลืออยู่ที่หลอดไฟฟ้าเพียงส่วนน้อยเท่านั้น

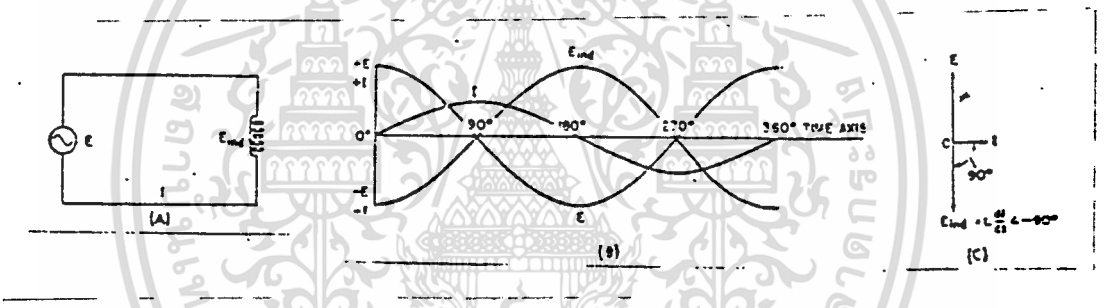
**ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า**

**( Relation Between Induced voltage and current )**

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดลงจะเป็นเหตุให้ฟลั๊กรอบ ๆ ขดลวดเปลี่ยนแปลงไปด้วย รูปที่ 1-8 (A) ถ้ากระแสไฟฟ้าในวงจรเปลี่ยนแปลงค่าไปตามลักษณะของไซน์(Sinusoidal) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นรูปคลื่นของไซน์ (Sine Wave) ด้วย เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจะมีอัตรามากที่สุด ขณะที่มันกำลังเคลื่อนที่ผ่านศูนย์กลางของมันที่ตำแหน่ง 0° , 180° และ 360° ตามรูปที่ 1-8 (B) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของฟลั๊กจะมีค่ามากที่สุดตามเวลาต่าง ๆ เหล่านั้น เนื่องจากสาเหตุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวนี้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในขดลวดจะมีค่ามากที่สุด ตามช่วงเวลาเหล่านี้ ตามกฎของเลนซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศทางตรงกันข้าม หรือขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเสมอ ดังนั้นเมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังเพิ่มไปในทิศทางบวกที่ 0° แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีไฟฟ้าตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย และขัดขวางต่อการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าต่อไปเมื่อรูปของกระแสไฟฟ้ากำลังลดลงไปสู่ศูนย์ของมันที่ 180° แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีขั้วเหมือนกันกับกระแสไฟฟ้า และจะพยายามรักษาค่ากระแสไฟฟ้าไม่ให้ลดลง ดังนั้นจะเห็นว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงค่าล้าหลังกระแสไฟฟ้า 90° แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ E จะมากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $E_{ind}$ เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานของขดลวด เวกเตอร์ (Vector Diagram) ซึ่งใช้แสดงให้เห็นถึงทิศทางตรงกันข้ามระหว่าง E กับ $E_{ind}$ นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 1-8(C)




รูปที่ 1-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90° และเปลี่ยนแปลงก่อนหรือนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จ่ายให้แก่วงจรเสมอ จึงเรียกได้ว่า " แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน" (Counter e.m.f) หรือ "แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ" (Back e.m.f) ทั้งนี้เพราะว่ามันขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ผลของการเหนี่ยวนำที่มีต่อวงจรไฟฟ้าสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง
037170

## วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

## ( Alternating Current Circuit Containing Only Inductance )

การเหนี่ยวนำจะพยายามขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของกระแสไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำภายในตัวจะขัดขวางต่อการเพิ่มอันนี้ จึงเป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปทีละน้อยจนกว่าจะถึงค่าสูงสุดของมัน ในทำนองเดียวกันเมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรการเหนี่ยวนำลดค่าลงไป การเหนี่ยวนำก็จะพยายามขัดขวางต่อการลดอันนี้

ถ้าความแทรกซึม (Permeability) ของวงจรแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ในวงจรมีค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced voltage) จะมีค่าเป็น

$$Eav = L\, I/t \qquad (1\text{-}13)$$

เมื่อ L เป็นสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวนำภายในตัวมีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H) การเหนี่ยวนำภายในตัว (Self-inductance) จะมีค่า 1 H เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น 1 A/Sec แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับขึ้น 1 โวลท์ หรือ กำหนดเป็นอีกอย่าง คือถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจร 1 แอมแปร์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น 10 เส้น ในสมการ 1-12 นั้น Eav เป็นค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นโวลท์ I กระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์และ t เวลาเป็นวินาที

ในสมการ 2-12 นั้นหมายถึงการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าไปเป็น 1 แอมแปร์ ในเวลา t วินาที หรือเขียนค่าชั่วขณะได้ดังนี้

$$e = L \quad \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า}$$

$$e = L\, di/dt$$

เมื่อ di เป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา dt โดยกำหนดให้ dt เกิดขึ้นได้น้อยมากจนกระทั่ง di/ dt คงที่ในชั่วเวลานั้นๆ

ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ จะเห็นว่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เมื่อสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวนำภายในตัว (Coefficient of Self-induction) มีค่าคงที่

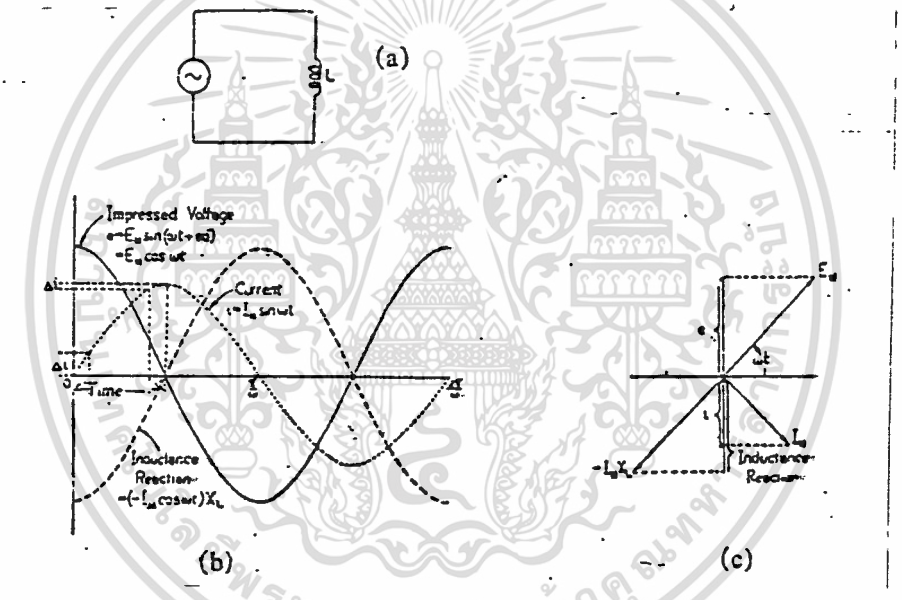
ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว ตามที่กล่าวมานั้นเป็นการสมมติอย่างหนึ่งทั้งนี้เพราะว่า ตัวนำอย่างง่ายๆ หรืออุปกรณ์ที่มีการเหนี่ยวนำจะประกอบขึ้นจากขดลวด ดังนั้นมันจึงต้องมีความต้านทาน (Resistance) อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามหลักทฤษฎีแล้วความต้านทานของขดลวดก็สามารถละทิ้งไปได้ ดังนั้นจึงพิจารณาเพียงผลของการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบ Sine wave ให้กับ inductor ตัวหนึ่งมันจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ทุกๆ ชั่วขณะ จึงทำให้เกิดการสมดุลย์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่าง (Shape) ขนาด (Magnitude) และตำแหน่ง Position หรือเฟส Phase ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจะเท่ากับและตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้เสมอ นั่นก็คือเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ จึงมีรูปร่างเป็นแบบไซน์ (Sinusoidal from ) ดังแสดงในรูปที่1-9(b)

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจึงอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีรูปร่างและขนาดตามความต้องการ นั่นคือกระแสไฟฟ้าจะปรับตัวของมันเองให้เหมาะกับความต้องการของวงจร เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเกิดขึ้นได้สมดุลย์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร




รูปที่ 1-9 รูป curve และ vector ของวงจรที่มีแต่การเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว กระแสไฟฟ้าจะล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม 90°

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นตัวเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ถ้าค่าการเหนี่ยวนำ (L) คงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาดู sinecurve ของกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 1-9(b) เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ก็พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้ากำลังผ่านค่าศูนย์ของมันนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดนั่นคือที่มุม 0° ,180° และ360° ของ cycle ดังนั้นในตำแหน่งเหล่านี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Voltage Reaction) จึงมีค่ามากที่สุดดังแสดงให้เห็นโดย curve เส้นไข่ปลาในรูป 1-9(b) และเมื่อกระแสไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้ากำลังผ่านค่าสูงสุดของมันนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันจะมีค่าน้อยที่สุดจนถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย นั่นคือที่มุม $90^\circ$ และ $270^\circ$ ของ cycle ดังนั้น ณ ตำแหน่งเหล่านี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจึงมีค่าเป็นศูนย์ ดัง curve เส้นไข่ปลาในรูป 1-9(b) เมื่อได้พิจารณาดู curve ของกระแสไฟฟ้ากับ curve ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ก็จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้านำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเป็นมุม $90^\circ$ จากกฎของ LEN'S แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองจึงต่างเฟสกันเป็นมุม $180^\circ$ นั่นคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้นำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ $180^\circ$ ไฟฟ้า ดังรูปที่ 1-9(b) ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจึงล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม $90^\circ$ หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้านำหน้ากระแสไฟฟ้าเป็นมุม $90^\circ$ ดังรูป 1-9(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรสามารถแสดงแทนได้ โดยใช้สมการชั่วขณะ
นั่นคือ

เมื่อ $I = Im \sin wt$ (1-14)

เพราะฉะนั้น $e = Em \sin (wt + 90^\circ) = Em \cos wt$ (1-15)

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า จากรูป curve ของกระแสไฟฟ้ารูป 1-3(b) จะเห็นว่าในหนึ่ง cycle กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนค่าจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุดจนถึงศูนย์ถึงสี่ครั้ง หรือในแต่ละ 1/4 ของ cycle ด้วยกัน เวลาที่ใช้ไปภายใน 1/4 ของ cycle จะเท่ากับ1/4 f วินาที ดังนั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าจาก 0 จนถึง Im หรือจาก Im ลงไปเป็น 0 ภายในเวลา 1/4 ของ cycle จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันเป็น $Im / 1/4f = 4 fIm$ Ampere/second ดังนั้นค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในตัวจะเป็น

$$Eav = L * I/t$$

แต่ $$I/t = 4 fIm$$

เพราะฉะนั้น $$Eav = 4 fLIm$$

ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเนื่องจาก

$$Em = Eav / 2 = 4\pi fLIm / 2 / \pi = 2\pi fLIm \quad (1\text{-}17)$$

ดังนั้น

$$Em/Im = 2\pi fL \quad (1\text{-}18)$$

หรือ $$E/I = 2\pi fL \quad (1\text{-}19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก E/I นั้นมีหน่วยเป็น ohm ดังนั้น $2\pi$ fl ก็มีหน่วยเป็น ohm ด้วยและเรียกว่า "ความต้านทานเนื่องจากการเหนี่ยวนำ" (Inductive reactance) ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับใช้ X เป็นสัญญลักษณ์ ดังนั้น

$$X_L = 2\pi \quad fL$$

หรือ

$$X_L = E / I \qquad (1\text{-}20)$$

ในรูป Vector 1-9(c) ที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นว่าแรงเคลื่อนต้านกลับ ($ImX_L$) เขียนห่างออกไปจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ (Em) เป็นมุม $180^\circ$ และเขียนกระแสไฟฟ้าล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรเป็นมุม $90^\circ$

**กำลังไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว**

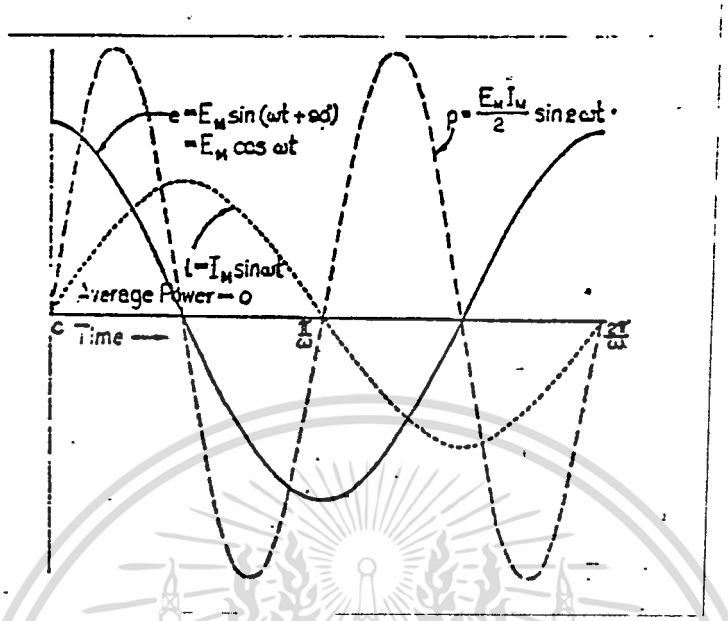
**( Power in circuit containing only inductance )**

รูป curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะของวงจรที่มีการเหนี่ยวนำอย่างเดียวนั้น ได้จากการนำค่าผลคูณของค่าชั่วขณะ ของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาเขียน ถ้าสมการของกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น $I = Im\ Sin wt$ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น $e = Em\ Sin\ (wt + 90^\circ) = Em\ Cos wt$ กำลังไฟฟ้าชั่วขณะจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} P &= ei \\ &= Em\ Cos wt\ Im\ Sin wt \\ &= Em\ Im\ (Sin\ t\ Cos wt) \\ &= Em\ Im / 2\ Sin\ 2\ wt \end{aligned} \qquad (1\text{-}21)$$

ในรูปที่ 1-10 curve เส้นเต็มนั้นเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร curve เส้นไข่ปลาเป็นกระแสไฟฟ้า (ล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้า $90^\circ$) และ curve เส้นขาดเป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ ซึ่งจะเห็นว่ามันมีความถี่เป็นสองเท่า โดยมีค่าบวกและค่าลบเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 1-10 curve ของกำลังไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวนั้น ค่าด้านบนและด้านล่างของแกนจะเท่ากัน นั่นแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าในวงจรเช่นนี้เท่ากับศูนย์ ส่วนที่เป็นบวกแสดงว่าวงจรเก็บพลังงานเอาไว้ ส่วนที่เป็นลบแสดงว่าวงจรจ่ายพลังงานกลับคืนไปยังแหล่งกำเนิด

เมื่อกระแสไฟฟ้าในวงจรที่มีการเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะแสดงถึงพลังงานที่เก็บเอาไว้ ดังนั้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น วงจรไฟฟ้าอันนี้ก็จะเก็บพลังงานเอาไว้โดยการรับมาจากแหล่งกำเนิด กำลังไฟฟ้าที่วงจรได้รับจากแหล่งกำเนิดจะให้เป็นบวกเสมอ ในระหว่างช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้ากำลังลดลงสนามแม่เหล็กจะยุบตัว และพลังงานที่มันเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กจะถูกจ่ายกลับคืนไปยังแหล่งกำเนิดเมื่อวงจรจ่ายพลังงานกลับคืนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายออกไปนี้จะกำหนดให้เป็นลบ พลังงานที่สะสมไว้ในการเหนี่ยวนำจะหาค่าได้จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า กับค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นั่นคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากค่าศูนย์จนถึงค่าสูงสุด I ของมันแล้วค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าจะเป็น I/2 ถ้า L เป็นค่าการเหนี่ยวนำของวงจร ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $e = LI / t$ เมื่อ t เป็นเวลาในการเปลี่ยนจาก 0 จนถึง I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้า = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ * ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า

$$= L * I/t * I/2 = LI^2 / 2t$$

เพราะฉะนั้น พลังงานไฟฟ้า = กำลังไฟฟ้า * เวลา

เพราะฉะนั้น พลังงานไฟฟ้าที่สะสมไว้ $= LI^2 / 2$ จูล (Joule)

$$W = LI^2 / 2 \qquad (1\text{-}22)$$

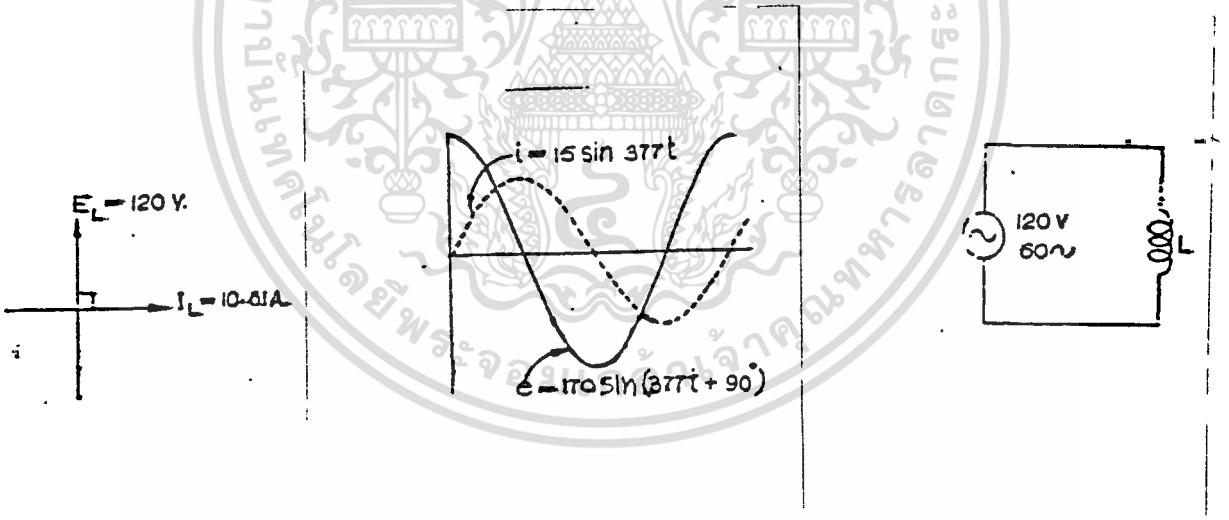
เมื่อ L เป็นเฮนรี่ I เป็นแอมแปร์

เมื่อหากำลังไฟฟ้าฉลี่ยของสมการ (1-20) คือ $P = Im/2 \sin 2t$ ตลอด cycle จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือคำนวณได้จาก

$$P = EI \cos\theta$$

$$= EI \cos 90^{\circ}$$

$$= 0 \quad \text{WATT}$$




**รูปที่ 1-11 วงจรที่มีการเหนี่ยวนำอย่างเดียว**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีการประจุ

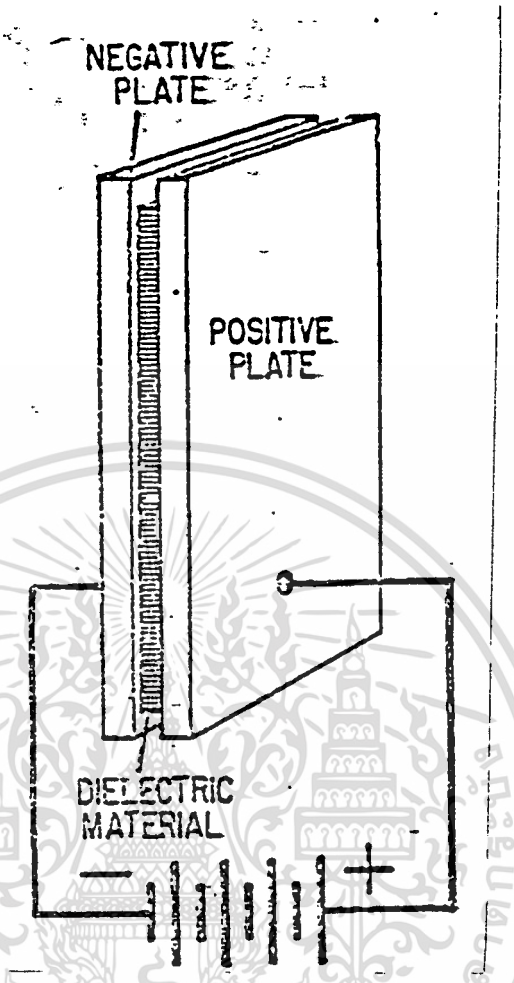
## การประจุ (Capacitance)

การประจุ (Capacitance) เป็นคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งมันพยายามต่อต้านหรือขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร นั่นคือ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันเพิ่มขึ้น การประจุจะขัดขวางต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ และจะพยายามหน่วงเหนี่ยวการเพิ่มของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรให้เป็นไปอย่างช้า ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันลดลง การประจุจะพยายามรักษาค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มันได้รับในตอนสุดท้ายเอาไว้ ดังนั้น จึงทำให้การลดเป็นไปอย่างช้า ๆ ตามที่กล่าวมานี้ ผลที่ปรากฏอย่างชัดแจ้งของการประจุในวงจร คือวงจรไฟฟ้าที่มีการประจุแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรที่จะสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว เหมือนกับในวงจรที่มีการประจุ (Noncapacitive circuit) การประจุ ได้กำหนดให้คุณสมบัติของวงจรที่สามารถเก็บพลังงานเอาไว้ในรูปของสนามไฟฟ้า (Electricfield)

## ตัวประจุ (Capacitor)

ในรูปที่ 2-1 เป็นภาพของตัวประจุ (Capacitor) ที่มีรูปร่างอย่างง่าย ๆ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าสองแผ่น วางแยกกันโดยมีแผ่นฉนวนบาง ๆ เป็นชั้น ๆ กั้นอยู่ตรงกลาง เมื่อนำแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าทั้งสองต่อเข้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด (Battery) ดังรูป แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะออกแรงดันให้ electron ไปอยู่ในแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าแผ่นหนึ่ง ซึ่งจะทำให้แผ่นนี้เป็นลบและดึงเอา electron ออกจากแผ่นโลหะตัวนำอีกแผ่นหนึ่งซึ่งจะทำแผ่นอันหลังเป็นบวก electron ไม่สามารถไหลผ่านฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า "Di-electric" ไปได้ เนื่องจากปริมาณของ electron จำนวนหนึ่งได้บรรจุหรือได้รับการประจุไฟฟ้าเข้าไปในตัว Capacitor ตัวหนึ่ง จึงกล่าวได้ว่ามันมี Capacity คุณสมบัติอันนี้หมายถึง Capacitance ของมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2-1 ตัวประจุแบบง่าย ๆ

กิริยาเบื้องต้นของการประจุ ดังรูปที่ 2-2 รูป (A) ตัวประจุอยู่ในสภาพสมดุลย์หรือไม่มีประจุ เมื่อเปิดสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่ง 1 รูป (B) กระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งของ Battery จะ charge เข้าไปอยู่ในตัว capacitor โดยทันทีที่ทันใด แนวโน้มตามธรรมชาติของ capacitor นั้นมันจะพยามยามกลับคืนสู่สภาพสมดุลย์ตามอย่างเดิมของมัน โดยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่าน Battery ในทิศทางทวนเข็ม แนวโน้มอันนี้จะมีค่าน้อยในตอนแรกๆ แต่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Capacitor กำลัง charge อยู่ในวงจร

คุณสมบัติอันนี้ กล่าวโดยทั่วไปแล้ว เป็น Counter e.m.f. เนื่องจากมันเป็น Voltaic Force จริงๆ ดังนั้น เมื่อ Couter e.m.f. ของ Capacitor เพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ Battery จึงกล่าวได้ว่า Capacitor ได้ charge อย่างสมบูรณ์ และกระแสไฟฟ้าในวงจรจะเป็นศูนย์ เมื่อ charge ได้อย่างสมบูรณ์แล้ว สวิทช์จะถูกปิดกลับไปอยู่ตำแหน่ง 2 ดังรูปที่ 2-2 (C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

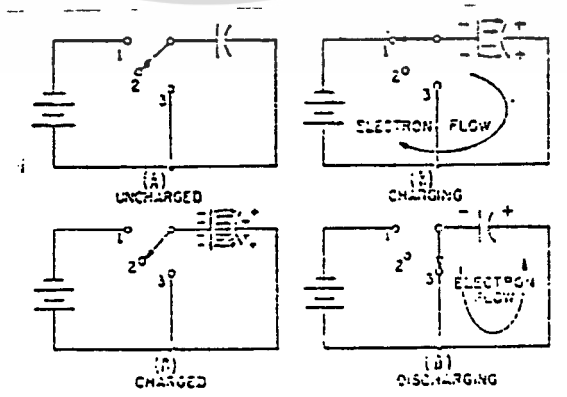
ในสภาพเช่นนี้ capacitor จะเป็นแหล่งของพลังงานศักย์เหมือนกับ battery แผ่นประจุไฟฟ้าทั้งสองของมันจะทำให้เกิดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้ว 2 และขั้ว 3 ของสวิทช์ นอกจากนี้แล้ว electric Field Static จะเกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองจะออกแรงกระทำผ่านทาง Dielectric ซึ่งเป็นแรงจริงๆ ทาง physic อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการดึงดูดซึ่งกันและกันของประจุไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน ดังนั้น Dielectric จึงต้องมีโครงสร้างแข็งแรงพอที่จะต้านความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ เมื่อสวิทช์ไปอยู่ตำแหน่ง 3 capacitor จะ discharges ดังนั้นมันจะทำให้ตัวของมันกลับไปอยู่สภาพสมดุลย์อีก เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นทั้งสองเป็นศูนย์ ประจุไฟฟ้าทั้งสองแผ่นจะเท่ากัน electric field static จะผ่อนคลายลงไป

ความจริงที่น่าสังเกตสองอย่างจากการต่อในรูปที่ 2-2 (B) คือ

1) หลังจาก electom จำนวนหนึ่งไหลไปได้ชั่วขณะหนึ่งไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าครงจะหยุดไหลอย่างสมบูรณ์
2) free electron ไม่สารมารถ dielectric ไปสู่อีกแผ่นหนึ่งได้ เพราะว่า dielctric เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี

จำนวน electron ที่กระจายอยู่ในแผ่นลบนั้น มันจะถูกยึดเอาไว้โดยแรงดึงดูดซึ่งกันและกันจากประจุไฟฟ้าของแผ่นบวก นั่นแสดงว่าเกิดมีขั้วสนามไฟฟ้าขึ้นสองขั้ว (บวกและลบ) แล้วส่งแรงดึงดูดซึ่งกันและกันผ่านทาง dielectric

เส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นประจุไฟฟ้าลบนั้น จะถูกส่งออกไปและสิ้นสุดที่แผ่นประจุไฟฟ้าบวกเส้นแรงไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะเป็นสูญญากาศ โลหะตัวนำไฟฟ้าเป็นส่วนมากไม่สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เพราะว่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในโลหะตัวนำได้อย่างอิสระ จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ถ้ามีแรงเกิดขึ้นจาก charged bodies ต่างชนิดกันสองตัว จึงต้องแยกมันออกจากกันโดยฉนวนไฟฟ้า




**รูปที่ 2-2 กริยาของตัวประจุ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัสดุไดอีเล็กทริก (Dielectric Materials)

วัสดุต่างๆ ที่มีความสามารถแตกต่างกันต่อการรับสนามไฟฟ้า หรือใช้เป็น dielectric สำหรับ capacitor ปรากฏการณ์เช่นนี้ค่อนข้างจะคล้ายกับความแทรกซึมในวงจรแม่เหล็ก วัสดุ dielectric หรือตัวฉนวน เป็นอัตราความสามารถของมันต่อการรับสนามไฟฟ้าได้ในเทอมของตัวเลข ซึ่งเรียกว่า Dielectric (Constant dielectric ) ที่มีค่าคงที่สูงๆ จะเป็น dielectric ที่ดี

Dry air เป็น dielectric มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ค่าคงที่ของ dielectric ของวัสดุ dielectric อย่างหนึ่งได้จากอัตราส่วนของค่า capacitance ของ capacitor ซึ่งใช้วัสดุชนิดพิเศษเป็น dielectric ต่อค่า capacitance ของ capacitor ตัวเดียวกัน เมื่อใช้อากาศเป็น dielectric โดยวิธีของการเปรียบเทียบค่าคงที่ของ dielectric ของน้ำบริสุทธิ์เป็น 81, แก้วอย่างดีผสมตะกั่ว (Flint glass) เป็น 9.9 กระดาษชุบไข (Paraffin Paper) เป็น 3.5

ขอบเขตของค่าคงที่ของ dielectric มีขอบเขตจำกัดมากกว่าความแทรกซึมค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ dielectric สำหรับวัสดุธรรมชาติบางชนิด กำหนดให้ดังตารางต่อไปนี้

| วัสดุ | ค่าคงที่ของ Dielectric |
|---|---|
| อากาศ | 1 |
| กระดาษ paraffin | 3.5 |
| ไมก้า | 6 |
| แก้วอย่างดีผสมตะกั่ว | 9.9 |
| เมทิลอัลกอฮอล์ | 3.5 |
| กลีเซอรีน | 56.2 |
| น้ำบริสุทธิ์ | 81 |

## หน่วยของการประจุ ( unit of capacitance )

การประจุ (Capacitance) ของตัวประจุ (Capacitor) เป็นสัดส่วนกับ ปริมาณของประจุไฟฟ้า (Charge) ที่มันสามารถเก็บไว้ได้จากแต่ละแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างแผ่นทั้งสองของมัน ตัวประจุมีค่าการประจุ 1 ฟาราด (Farad) เพื่อปริมาณของประจุไฟฟ้า (Charge) 1 คูลอมบ์ (Colomb) ที่จ่ายให้กับมัน แล้วทำให้มันเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น 1 โวลท์ ( 1 คูลอมบ์ จะเท่ากับจำนวนอีเล็คตรอน $6.28 * 10^{18}$ ตัว ) ความสัมพันธ์ระหว่างการประจุปริมาณของประจุไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าแสดงเป็นสูตรเบื้องต้นของตัวประจุได้ดังต่อไปนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = Q / E \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ C ค่าการประจุเป็นฟาราด Q ปริมาณของประจุไฟฟ้า เป็นคูลอมบ์ และ E ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นโวลท์

ตัวประจุ (Capacitor) ขนาด 1 ฟาราด จะมีขนาดมหึมา เนื่องจากการใช้ฟาราดเป็นหน่วยที่จำกัดไว้ในนิยามและใช้ในการคำนวน ในทางปฏิบัติหน่วยของการประจุเป็นไมโครฟาราด(pF) และไมโครไมโครฟาราด (pF) ตัวประจุที่มีค่า 1 ไมโครฟาราด จะสามารถเก็บประจุไฟฟ้า ได้ 1 ไมโครคูลอมบ์ (6.28 *$10^{12}$ อีเล็คตรอน) เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ระหว่างแผ่นทั้งสอง 1 โวลท์

**อิทธิพลของตัวประกอบที่มีต่อค่าของการประจุ**

**( Factors Affecting The Value of Capacitance )**

การประจุของตัวประจุจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบทั้ง 3 ดังต่อไปนี้

1. พื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้า
2. ระยะห่างระหว่างแผ่น
3. ค่าที่ของไดอีเล็คตริคของวัสดุที่ใช้ระหว่างแผ่น

ตัวประกอบทั้งสามเหล่านี้ จะสัมพันธ์กับการประจุของตัวประจุ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นวางขนานกันสองแผ่นจะสูตรดังนี้

$$C = 0.2249 \ ( KA / D ) \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ C เป็นไมโครฟาราด A พื้นที่ของแผ่นโลหะแผ่นเดียวเป็นตารางนิ้ว D เป็นระยะห่างของแผ่นเป็นนิ้ว K เป็นค่าคงที่ของไดอีเล็คตริคที่ใช้กั้นระหว่างแผ่น

ตัวอย่างการประจุ (Capacitance) ของตัวประจุ (Capacitor) ที่มีแผ่นวางขนานกันมีอากาศเป็นไดอีเล็คตริค วางห่างกัน 1.0394 นิ้ว พื้นที่ของแต่ละแผ่นเป็น 15.5 ตารางนิ้วค่าการประจุคงประมาณจะเป็น

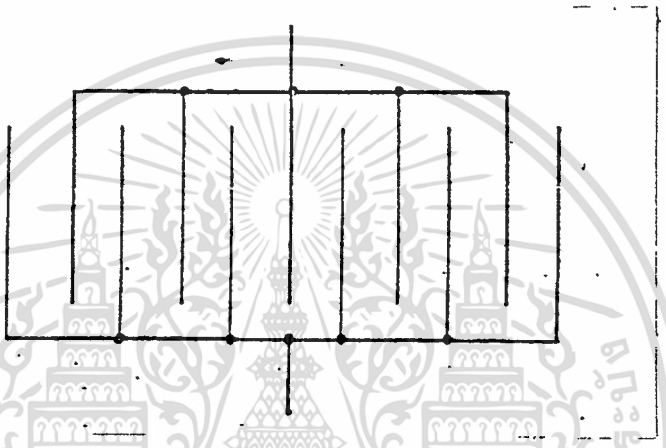
C= 0.225 (1*15.5 /0.2394) = 88.5 ไมโครฟาราด

จากสูตรนี้จะเห็นว่า ค่าการประจุจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ของแผ่นโลหะเพิ่มขึ้น และค่าของมันจะลดลงเมื่อความห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วค่าของมันจะเพิ่มถ้าค่า K เพิ่มขึ้น

ค่าคงที่ของไดอีเล็คตริค K เป็นการประจุสัมพันธ์ (Relative Capacitance) เมื่อใช้วัสดุอื่นซึ่งมีค่าอากาศเป็นฉนวนกั้นระหว่างแผ่น เช่น ถ้าใช้ไมก้าเป็นไดอีเล็คตริคแทนอากาศการประจุจะเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่า เพราะว่าค่าคงที่ของไดอีเล็คตริค ของไมก้าเป็น 6 และของอากาศเป็น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าตัวประจุประกอบด้วยแผ่นขนานกันมากกว่าสองแผ่น การคำนวณหาค่าการประจุจะต้องคูณสูตร 2-2 ด้วย N-1 เมื่อ N เป็นจำนวนแผ่น ซึ่งแผ่นทั้งหลายที่วางไขว้กันแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-3 จะทำให้ผลของการประจุเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 แผ่น ซึ่งมีพื้นที่ของแผ่นระยะห่างและวัสดุไดอีเล็ดริคเหมือนกัน



รูปที่ 2-3 โครงสร้างของตัวประจุหลายแผ่น

**การประจุไฟฟ้าและการจ่ายประจุไฟฟ้าของวงจรอนุกรม R-C**

**( Charge And Discharge of An R-C Series Circuit )**

กฎของโอห์มกล่าวว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างความต้านทานจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมัน คูณกับค่าความต้านทานของมัน " นี่ก็หมายความว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างความต้านทานเฉพาะ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านมันเท่านั้น

ตัวประจุ (Capacitor) ตัวหนึ่ง สามารถเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของอีเล็คตรอนไว้ได้เมื่อไม่มีประจุไฟฟ้า (uncharge) แผ่นทั้งสองจะมีจำนวนอีเล็คตรอนอิสระเท่ากัน เมื่อได้รับประจุไฟฟ้าจะทำให้แผ่นหนึ่งมีอีเล็คตรอนอิสระมากกว่าอีกแผ่นหนึ่ง ความแตกต่างของจำนวนอีเล็คตรอนเป็นการวัดอย่างหนึ่งของประจุไฟฟ้าในตัวประจุ การสะสมของประจุไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วของตัว ประจุและการสะสมประจุไฟฟ้าจะกระทำต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมันมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มันประจุไฟฟ้า ในตัวประจุจะมีค่าสัมพันธ์กับ การประจุ (Capacitance) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังแสดงต่อไปนี้ คือ

$$Q = CE$$

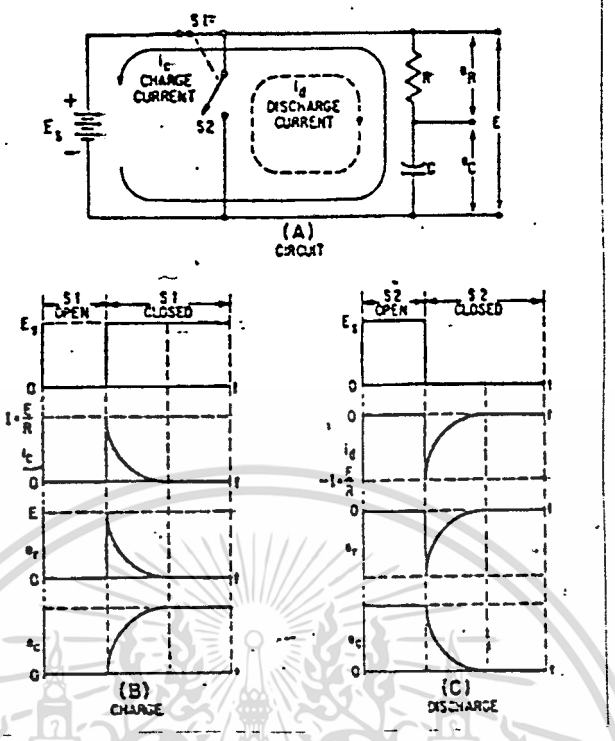
เมื่อ Q เป็นปริมาณประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์, C เป็นการประจุเป็นฟาราด E เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นโวลท์ ดังนั้น เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่ามากจะทำให้ประจุไฟฟ้าในตัวประจุไฟฟ้ามีค่ามากตามไปด้วยตัวประจุจะรักษาเริ่มประจุไฟฟ้าของมันไว้ได้เป็นเวลานาน เว้นแต่จะมีทางสำหรับให้มันจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) ออกไป อย่างไรก็ตาม ตัวประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการปฏิบัติบางชนิด จะมีการรั่วไหลผ่านทางไดอีเล็คตริคได้บ้าง ดังนั้นประจุไฟฟ้าของมันจะค่อย ๆ รั่วออกไป

วงจรซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและการประจุสามารถต่อเข้าเป็นวงจรโดยผ่านสวิทช์ ดังแสดงในรูปที่ 2-4 (A) การต่อวงจรอนุกรมแบบนี้เรียกว่า "วงจรอนุกรม R-C " ถ้าปิดสวิทช์ $S_1$ อีเล็คตรอนจะไหลทวนเข็มนาฬิการอบวงจรที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ ตัวประจุ และตัวต้านทานอีเล็คตรอนจะหยุดไหล เมื่อ C ได้รับประจุไฟฟ้าจนทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของมันเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ในชั่วขณะที่กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล จะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม R จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า (Charging) ในตอนแรก I จะมีค่าเท่ากับ E / R ในรูป 2-4 (B) แสดงให้เห็นว่า ในชั่วขณะที่ปิดสวิทช์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้วงจร E จะปรากฏอยู่ระหว่าง R และแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง C จะเป็นศูนย์

การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร จะทำให้ตัวประจุได้รับประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว เพราะว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในตัวประจุจะเป็นสัดส่วนกับประจุไฟฟ้า (Charge) ของมัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง คือ $e_c$ จะปรากฏอยู่ระหว่างตัวประจุ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามหรือขัดขวางกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองนี้จะลบล้างกัน เป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า $e_c$ ระหว่างตัวต้านทานมีค่าเป็น $E_r - e_c$ ซึ่งจะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตก ($i_c R$) ระหว่างตัวต้านทาน เพราะว่า $E_r$ มีค่าคงที่ เมื่อ e เพราะว่า E มีค่าคงที่ เมื่อ $e_c$ เพิ่มขึ้นจะทำให้ $i_c$ ลดลง

กรรมวิธีการประจุไฟฟ้าจะดำเนินต่อไป จนกระทั่งตัวประจุได้รับประจุไฟฟ้าจนเต็มที่ (Fully Charged) และทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าของมันมีค่าเท่ากับของแบตเตอรี่ ซึ่งในขณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง R จะเป็นศูนย์และจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมัน รูปที่ 2-4 (B) แสดงการแบ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ $E_r$ ระหว่างความต้านทานและการประจุ ตลอดเวลาที่ทำการประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2-4 การรับประจุไฟฟ้าและการจ่ายประจุไฟฟ้าของวงจรอนุกรม R -C

ถ้า $S_2$ ปิด ($S_1$ เปิด) ตามรูปที่ 2-4 (A) จะทำให้ตัวประจุจ่ายกระแสไฟฟ้า $i_c$ ออกไป เพราะว่า $i_c$ มีทิศทางตรงกันข้ามกับ $i_c$ จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทาน มีขั้วตรงกันข้าม กับขั้วในเวลาของการประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แรงเคลื่อนไฟฟ้าอันนี้จะมีขนาดเท่าเดิม และจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในรูปลักษณะแบบเดิมในระหว่างการจ่ายประจุไฟฟ้าออกไป แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าตัวประจุเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกที่ตัวต้านทาน และมีทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูป 2-4 ( C ) แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว จากค่าในตอนแรกของมัน และจะลดลงเป็นศูนย์ได้อย่างช้า ๆ ดังแสดงในรูป

**เวลาคงที่ของ RC ( RC Time Constant )**

เวลาที่ตัวประจุต้องการใช้เพื่อรับประจุไฟฟ้า (Charge) จนถึง 63% (ที่แท้จริงแล้ว 63.2% ) ของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด หรือจ่ายประจุไฟฟ้า(Discharge) ของมันออกไปจนถึง 37 %( 36.8 % ) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำสุดของมัน เรียกว่าเวลาคงที่ของวงจร วงจร R - C พร้อมกับกราฟแสดงการรับประจุไฟฟ้าและจ่ายประจุไฟฟ้า แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-5 ค่าของเวลาคงที่เป็นวินาทีจะเท่ากับผลคูณของความต้านทานในวงจรเป็นโอห์ม กับค่าการประจุของมันเป็นฟาราด ซึ่งค่าต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-5 (A) RC เป็นสัญญาลักษณ์ที่ใช้แทนเวลาคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์บางอย่างซึ่งมีประโยชน์ในการคำนวณหาเวลาคงที่ RC มีดังต่อไปนี้ คือ

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| R | (โอห์ม) | * | C | (ฟาราด) | = | t (วินาที) |
| R | (เมกโอห์ม) | * | C | (ไมโครฟาราด) | = | t (วินาที) |
| R | (โอห์ม) | * | C | (ไมโครฟาราด) | = | t (ไมโครวินาที) |
| R | (เมกโอห์ม) | * | C | (ไมโครไมโครฟาราด) | = | t (ไมโครวินาที) |

เวลาคงที่อาจจะกำหนดให้เป็นเวลาที่ต้องการใช้ในการรับประจุไฟฟ้า หรือ จ่ายประจุไฟฟ้าถ้ามันรับประจุ หรือจ่ายประจุไฟฟ้าต่อเนื่องกันไปตามอัตราดอนแรกของมัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2-5 (B) ความเอียงของเส้นสัมผัสเส้นไข่ปลา OX แสดงให้เห็นอัตราดอกแรกของการรับประจุไฟฟ้าที่อัตรานี้ ตัวประจุไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา RC วินาที ในทำนองเดียวกัน ความเอียงของเส้นสัมผัส เส้นไข่ปลา YZ แสดงให้เห็นอัตราดอนแรกของการจ่ายประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลา และอัตรานี้ ตัวประจุไฟฟ้าจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกไปได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา RC วินาที

สมการแสดงการเพิ่มของแรงเคลื่อนไฟฟ้า $e_o$ ระหว่างตัวประจุ เป็นดังนี้คือ

$$e_o = E\ (1 / t\ /RC_{2.718}) \qquad 2\text{-}3$$

เมื่อ $e_o$ เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วขณะ (instantaneous Voltage) ระหว่างตัวประจุ (Capacitor) E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร (ในกรณีนี้มีค่า 100 โวลท์), t เวลาเป็นวินาที R ต้านทานเป็นโอห์ม, C การประจุเป็นฟาราด (ในกรณีนี้ 0.000,001 ฟาราด หรือ 1 μF) และจำนวน 2.178 เป็นล็อคฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm Base) รูปที่ 2-5 (B) เป็นกราฟที่แสดงผลของสมการนี้

เมื่อ t = RC เลขกำลัง, t/RC จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$e_o = E\ (1\text{-}/1/2.718) = 0.632E$$

หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเมื่อ t = Rc $e_o$ จะเท่ากับ 63.2% ของค่าสูงสุดของ E เมื่อค่าสูงสุด 100 โวลท์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวประจุเป็น 63.2 โวลท์ ในเวลา RC วินาที นั่นคือ ใน 10 ไมโครวินาที

สมการของกระแสไฟฟ้าในการประจุไฟฟ้า I คือ

$$i_o = (1/\ t/\ RC_{(2.178)}) \qquad 2\text{-}4$$

กราฟของสมการนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 2-5 (B) เมื่อ t = RC $i_o$ = 0.368 E/R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ เมื่อ t = 10 ไมโครวินาที, $i_o$ = 0.386 * 100/10 = 3.68 แอมแปร์

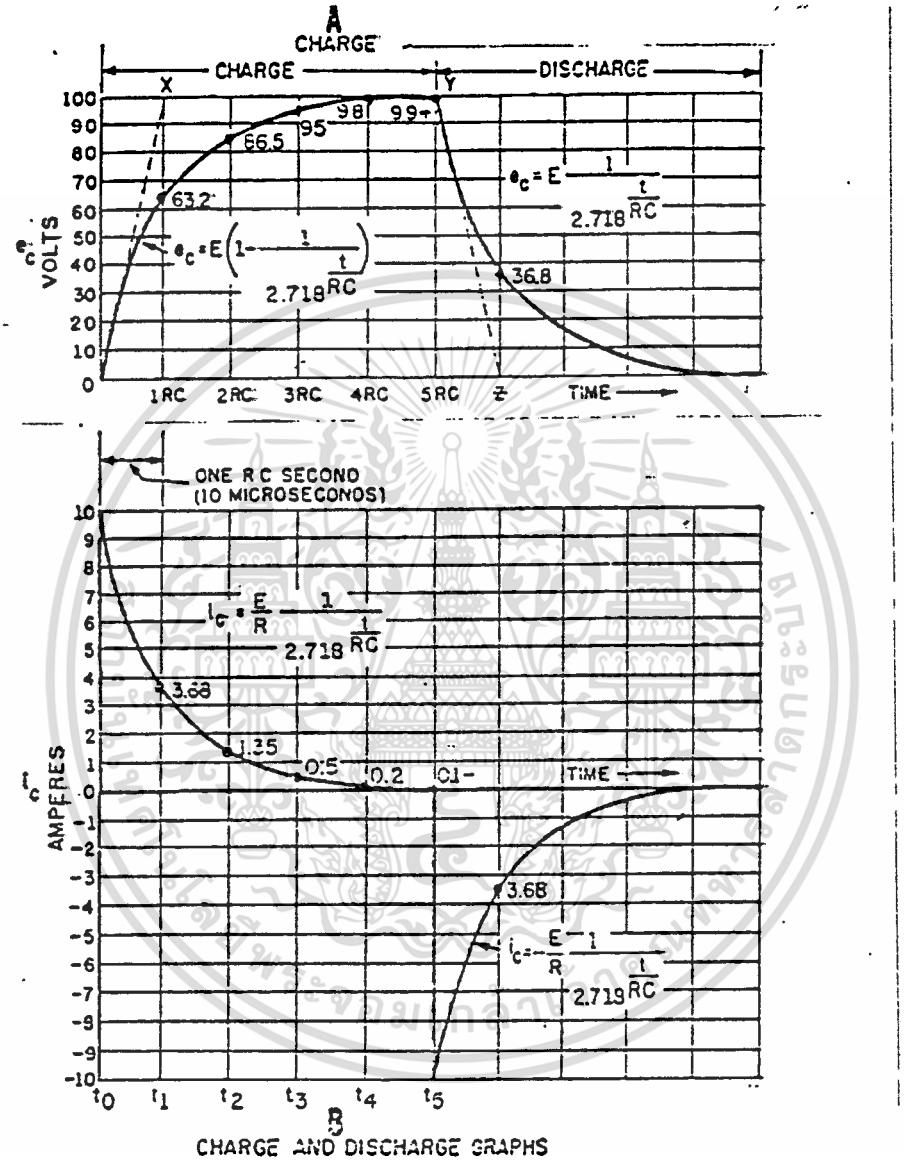
**แผนภูมิเวลาคงที่สากล ( Universal Time Constant Chart )**

เพราะว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรและค่าของ R และ C , R และ L นั้นปกติแล้วจะบอกค่าให้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แผนภูมิเวลาคงที่สากล รูปที่ 2-6 ได้ เส้นโค้ง (Curve ) A เป็นกราฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวประจุ (Charge) ซึ่งมันก็เป็นกราฟของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และแรงเคลื่อนไฟฟ้า ระหว่างตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ในการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า เส้นโค้ง ( Curve ) B เป็นกราฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุ ( Capacitor) ในการจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) และกระแสไฟฟ้าของตัวประจุ (Capacitor) ในการรับประจุไฟฟ้า และการลดของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวประจุในการรับประจุไฟฟ้า

มาตราส่วนของเวลา (มาตราส่วนตามแกนนอน) ได้แบ่งเป็นขั้น ๆ ในเทอมของ RC หรือ L/R เวลาคงที่ ดังนั้นเส้นโค้งเหล่านี้ สามารถนำไปใช้กับค่าใด ๆ ของ R และ L หรือ R และ L ได้

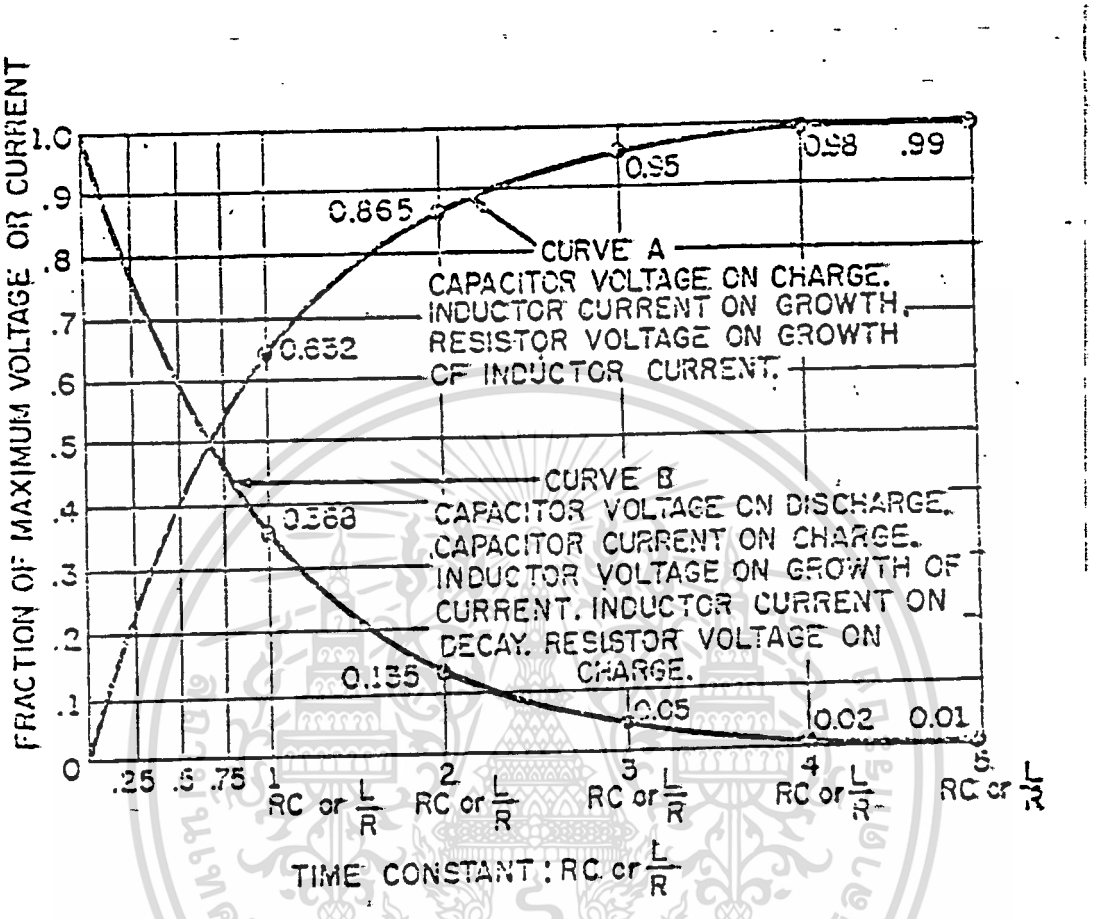
มาตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (มาตราส่วนตามแกนตั้ง) ได้แบ่งเป็นขั้น ๆ ในเทอมของเศษส่วนของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นเส้นโค้งเหล่านี้สามารถนำไปใช้กับค่าใด ๆ ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าได้ ถ้าทราบค่าเวลาคงที่และค่าตอนแรกหรือตอนท้ายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร ปัญหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างส่วนต่าง ๆ ของวงจรสามารถหาได้จากเส้นโค้งเหล่านี้ สำหรับเวลาใด ๆ ภายหลังจากปิดสวิทช์ ไม่ว่าจะเป็นการรับประจุไฟฟ้า (Charge) หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) กระแสไฟฟ้าในวงจรก็สามารถทราบได้จากเหตุผลอย่างเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2-5 เวลาคงที่ R-C**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2-6 แผนภูมิเวลาคงที่สากลสำหรับวงจร R-C และ R-L

ปัญหาต่อไปนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่า แผนภูมิเวลาคงที่สากลจะสามารถนำไปใช้ได้อย่างไร

ในวงจรหนึ่งต้องการให้ตัวประจุรับประจุไฟฟ้าถึง 1/5 หรือ 0.2 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดในการที่ใช้ประจุไฟฟ้าภายในเวลา 100 ไมโครวินาที (0.0001 วินาที) เนื่องจากการพิจารณาสาเหตุอื่น ๆ ตัวต้านทานจะต้องมีความต้านทาน 20,000 โอห์ม ตัวประจุจะมีขนาดเท่าไร

เส้นโค้ง A จะใช้ในการพิจารณาหาเวลา RC ที่ต้องการ ทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น 0.2 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเต็มที่ เวลาที่ใช้จะต้องน้อยกว่า 0.25RC (จากเส้นโค้ง A) โดยประมาณแล้วให้เท่ากับ 0.22RC เวลา 0.21RC นี้จะเท่ากับ 100 ไมโครวินาที ดังนั้น RC จะเท่ากับ 100/0.22 = 455 ไมโครวินาที หรือ 0.000452 วินาที นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RC = 0.000455$$

แทนค่า R ลงไป จะทำให้ทราบค่า C คือ

$$C = 0.000455 / 20,000 = 0.000,000,023 \text{ ฟาราด}$$

หรือ 0.023 ไมโครฟาราด

ในกรณีที่แสดงในรูปที่ 2-5 จะไม่สมบูรณ์นัก นั่นคือ การรับประจุไฟฟ้า (Charge) หรือจ่ายประจุไฟฟ้า (Discharge) (การเพิ่ม หรือการลด) ไม่สมบูรณ์ทีเดียวในเวลา 5 RC หรือ 5 L/R วินาที อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าถึง 0.99 ของค่าสูงสุด (ตรงกับ 5 L/R) กราฟจะมีความแน่นอนที่จะใช้กับจุดประสงค์ต่าง ๆ ได้

**ตัวประจุต่อแบบขนาน และแบบอนุกรม**

**( Capacitor In parallel and In Series )**

ตัวประจุ (Capacitors) ทั้งหลายสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันในแบบขนาน หรืออนุกรมเพื่อทำให้ได้ค่าตามต้องการ ซึ่งอาจจะรวมค่าแต่ละตัวเข้าด้วยกัน (ในการต่อแบบขนาน) หรือทำให้ค่าของมันน้อยลงไปกว่าตัวที่สุดในวงจร (ในการต่อแบบอนุกรม) ในรูปที่ 2-7 แสดงการต่อแบบขนานและแบบอนุกรม

ในรูปที่ 2-7 (A) แรงเคลื่อนไฟฟ้า E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวประจุทั้งหมด และประจุไฟฟ้าทั้งหมด $Q_t$ จะเท่ากับผลบวกของแต่ละประจุไฟฟ้า $Q_1$ $Q_2$ และ $Q_3$ จากสมการของตัวประจุ

$$C = Q / E$$

ประจุไฟฟ้าทั้งหมดเป็น

$$Q_t = C_t E$$

เมื่อ C เป็นการประจุ (Capacitance) ทั้งหมดในการต่อแบบขนาน ดังนั้นประจุไฟฟ้าทั้งหมด คือ

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$C_t E = C_1 E + C_2 E + C_3 E$$

เอา E หารสมการคลอดจะได้

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 \qquad (2\text{-}4)$$

ค่าการประจุทั้งหมดของตัวประจุจำนวนหนึ่งที่ต่อขนานกัน จะเท่ากับผลบวกของแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการต่อแบบอนุกรม รูปที่ 2-7(B) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทุก ๆ ส่วนของวงจรเท่ากันแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ตัวประจุแต่ละตัวในระหว่างรับประจุไฟฟ้า (Charge) และผลบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ที่จ่ายให้แก่วงจรโดยใช้สมการของตัวประจุ แรงเคลื่อนไฟฟ้า E ที่จ่ายให้จะเท่ากับประจุไฟฟ้าทั้งหมดหารด้วยการประจุทั้งหมด นั่น คือ

$$E = Ct / Qt$$

ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด Qt จะเท่ากับประจุไฟฟ้าในตัวประจุตัวใดตัวหนึ่ง เพราะว่ากระแสไฟฟ้าไหลเท่ากันตลอดเวลา และเพราะว่าประจุไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้า คูณด้วยเวลาเป็นวินาที (Q=It) ดังนั้น

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

แต่

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

เมื่อ $E_1$ , $E_2$ และ $E_3$ เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุทั้งสาม ดังนั้น

$$Qt/Ct = Q_1/C_1 + Q_2/C_2 + Q_3/C_3$$

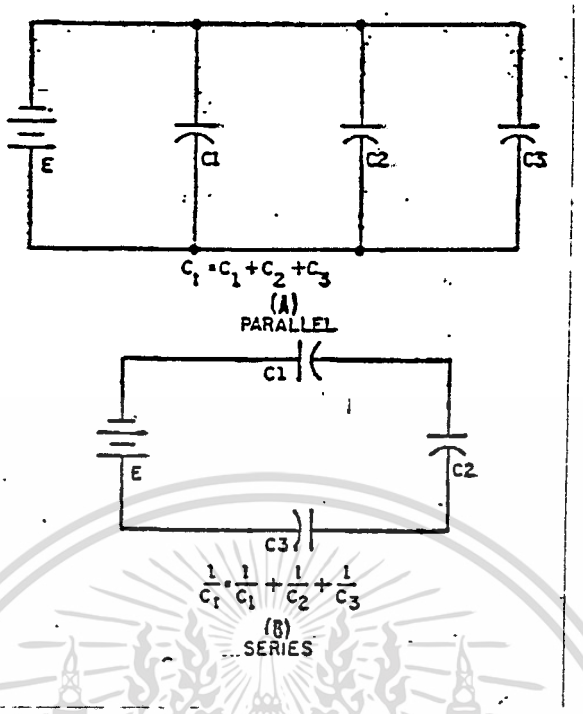
เอา $Q_t$ หารสมการตลอด จะได้

$$1/C_t = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$$

ส่วนกลับของการประจุทั้งหมดของตัวประจุจำนวนหนึ่งที่ต่อแบบอนุกรม จะเท่ากับผลบวกของส่วนกลับของแต่ละตัว

การรวมค่าประจุที่ต่อแบบขนาน จะเหมือนกับการรวมค่าตัวต้านทานในแบบอนุกรม และ การรวมค่าตัวประจุในแบบอนุกรมจะเหมือนกับการรวมค่าตัวต้านทานในแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.7 ตัวประจุต่อแบบขนานและแบบอนุกรม

**ชนิดของตัวประจุ ( Capacitor Type )**

ตัวประจุสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ ชนิดค่าคงที่ และชนิดปรับค่าได้

**- ตัวประจุที่มีค่าคงที่ ( Fixed Capacitors )**

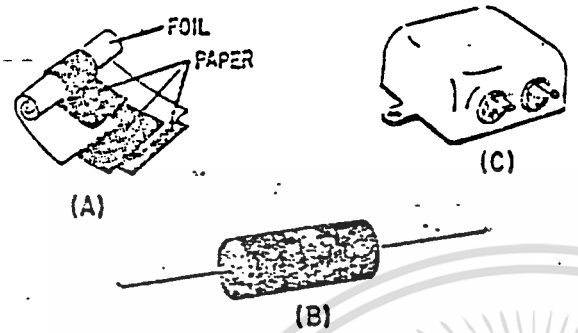
ตัวประจุแบบนี้สร้างขึ้นเพื่อให้มีการประจุคงที่ ซึ่งสามารถแบ่งออกตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นไดอีเล็ตริค เช่น กระดาษ น้ำมัน ไมก้า และอีเล็คโทรไลท์

ตัวประจุชนิดกระดาษ (Paper Capacitors) แผ่นตัวนำไฟฟ้าของตัวประจุแบบนี้ทำจากแผ่นโลหะบาง ๆ และใช้กระดาษชุบไขกั้นกลาง การประจุของตัวประจุแบบนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 200 ไมโครฟาราด ถึงหลาย ๆ ไมโครฟาราด แผ่นโลหะบาง ๆ และกระดาษชุบไขจะม้วนรวมเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก แล้วผนึกด้วยไขกันความชื้น และป้องกันการผุและการรั่วไหล โลหะตัวนำสองเส้นจะนำมาต่อเข้ากับแผ่นซึ่งแต่ละเส้นจะโผล่ออกมาภายนอกในแต่ละปลายของตัวประจุ ตัวประจุแบบนี้บางตัวขั้วอันหนึ่งของมันจะทำเครื่องหมายเป็นกราวด์ (Ground) ซึ่งหมายความว่า ขั้วอันนี้ท่ากับแผ่นโลหะด้านนอกของตัวประจุ

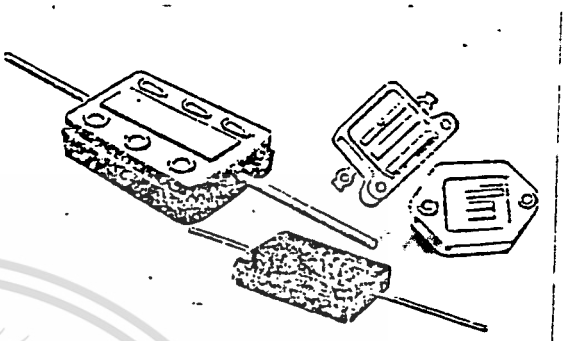
ชนิดของการหุ้มตัวประจุแบบนี้มีหลายอย่าง เช่น ทำเป็นหลอดกระดาษแข็ง หรือเป็นพลาสติกแข็งในรูปที่ 2-8(A) เป็นตัวประจุที่หุ้มด้วยหลอดกระดาษแข็งในรูป (B) เป็นตัวประจุที่หุ้มด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษแข็งอย่างสมบูรณ์ ส่วนในรูป ( C ) นั้นเป็นตัวประจุที่ผนึกอยู่ในที่หลอดโลหะ ซึ่งใช้เป็นขั้วของมันขั้วหนึ่ง




รูป 2-8 ตัวประจุแบบกระดาษ



รูป 2-9 ตัวประจุแบบไมก้า

- ตัวประจุแบบไมก้า (Mica capacitor)

เป็นตัวประจุชนิดคงที่ ซึ่งทำจากแผ่นโลหะบาง ๆ โดยมีแผ่นไมก้าเป็นไดอิเล็คตริกกั้นกลาง เปลือกหุ้มตัวประจุแบบนี้ใช้พลาสติก ไมก้าเป็นไดอิเล็คตริกที่ดีและทนทานแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้สูงกว่ากระดาษตัวประจุแบบนี้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ไมโครไมโครฟาราด ถึงประมาณ 0.02 ไมโครฟาราด ตัวประจุแบบไมก้าชนิดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-9

-ตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติค (Electrolytic capacitor)

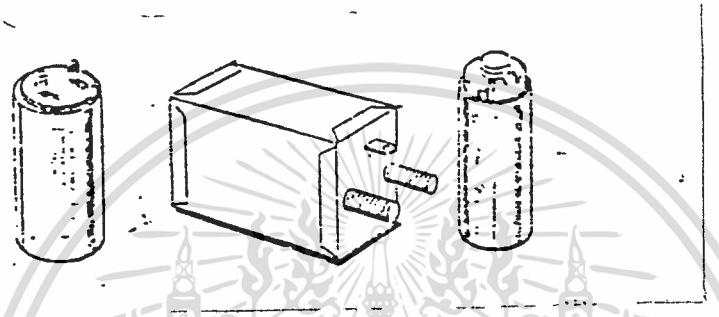
ตัวประจุแบบนี้จะมีการประจุ (Capacitance) อยู่ในระหว่าง 1 ถึง 1,500 ไมโครฟาราด ตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติคจะมีรูปร่างขนาดเล็กมาก แต่มีการประจุมากตัวประจุแบบอีเล็คโทรไลติคไม่เหมือนกับตัวประจุแบบอื่น ๆ คือ จะต้องบอกขั้วเอาไว้ และจะนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นห่วง ๆ (Pulsrting D. C.) อย่างเดียว อย่างไรก็ตามตัวประจุอีเล็คโทรไลติคชนิดพิเศษ ได้ทำขึ้นเพื่อใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับข้อควรทำก็คือจะต้องต่อด้วยประจุอีเล็คโทรไลติคให้ถูกขั้วที่กำหนดไว้ เว้นแต่ตัวที่นำมาใช้ กับไฟฟ้ากระแสสลับ

ตัวประจุอีเล็คโทรไลติค ประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่น โดยมีอีเล็คโทรไลกั้นกลางอีเล็คโทรไลอาจจะทำเป็นแบบของเหนียว (Paste) หรือแบบของเหลว ซึ่งจะสัมผัสอยู่กับขั้วลบ การรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

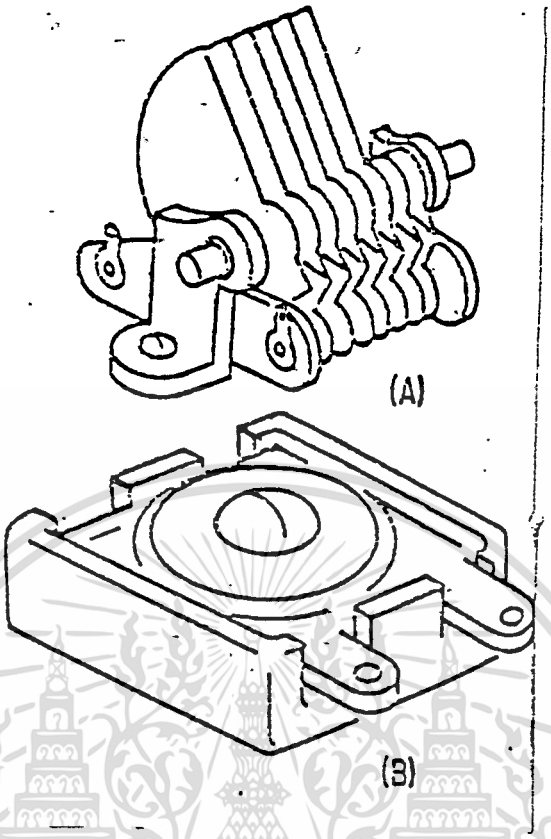
ที่อีเล็คโทรดบวก ซึ่งทำจากแผ่นอลูมินั่มและจะพับให้ได้พื้นที่น้อยที่สุด กรรมวิธีในการประดิษฐ์ประจุแบบนี้จะต้องกระแสไฟฟ้าผ่านมัน การไหลของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดออกไซด์เคลือบแผ่นอลูมินั่มอย่างบาง ๆ การวางแผ่นอีเล็คโทรดลบและบวกชิดกันมาก ๆ จะทำให้การประจุเพิ่มขึ้น

ตัวประจุอีเล็คโทรไลติคมีใช้อยู่สองชนิด คือ แบบเปียก (Wet electrdytic) และแบบแห้ง (Dry electrolytic) อีเล็คโทรไลท์แบบของเหลวบรรจุอยู่ในภาชนะที่ป้องกันการรั่วไหล และตัวประจุ

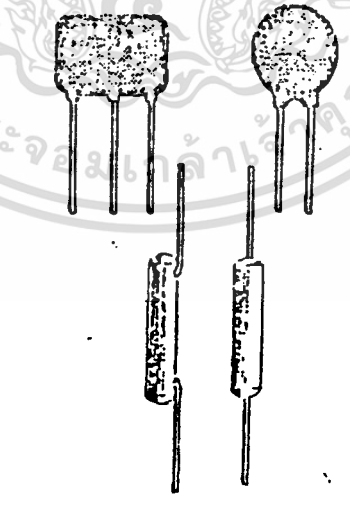


รูปที่ 2-10 ตัวประจุอีเล็คโทรไลติคบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2-11 ตัวประจุที่ปรับค่าได้**



**รูปที่ 2.12 ตัวประจุแบบเซอรามิค**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบนี้จะต้องอยู่ในแนวตั้ง ส่วนแบบแห้งนั้นจะทำเป็นของเหนียวทาติดไว้กับแผ่นกั้นเป็นวัสดุที่ดูดซึมได้ เช่น ผ้าโปร่ง กระดาษซึม แผ่นกั้นทำหน้าที่ยึดอีเล็คโทรไลท์ให้อยู่กับที่ และป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างแผ่นด้วย ตัวประจุอีเล็คโทรไลติกบางชนิด แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-10

-ตัวประจุที่ปรับค่าได้ ( Variable Capacitors )

ตัวประจุแบบนี้จะมีโครงสร้างเพื่อให้ค่าการประจุ (Capacitance) ของมันเปลี่ยนแปลงตัวประจุแบบนี้ชนิดหนึ่ง จะเป็นชนิดมีตัวหมุนและตัวอยู่กับที่ ประกอบด้วยแผ่นโลหะสองชุด ซึ่งทำให้แผ่นหมุน หมุนอยู่ระหว่างชุดของแผ่นอยู่กับที่ ใช้อากาศเป็นไดอีเล็คตริก เมื่อตัวหมุน หมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป ค่าการประจุของมันจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของตัวประจุแบบนี้ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2-11(A) และตัวประจุที่ปรับค่าได้โดยปรับสกรู เพื่อให้ระหว่างแผ่นทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าการประจุของมันเปลี่ยนไปด้วย

-ตัวประจุแบบเซอรามิค ( Ciramic Capacitors )

ตัวประจุแบบใหม่อาจจะสร้างให้มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้นั้น เรียกว่าแบบเซอรามิคซึ่งมีขนาดระหว่าง 1ไมโครไมโครฟาราด ถึง 0.01 ไมโครฟาราด เซอรามิคใช้เป็นไดอีเล็คตริกและแผ่นทะกอนบาง ๆ ของเงินทำเป็นแผ่นตัวนำไฟฟ้า ตัวประจุนี้มีขนาดเล็กและสร้างให้มีรูปร่างต่าง ๆ หลาย ๆ แบบดังแสดงในรูปที่ 2-12

**อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุ ( Voltage Rating Of Capacitors )**

ในการเลือกตัวประจุเพื่อนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้าโดยเฉพาะต้องพิจารณา (1) ค่าการประจุ (Capacitance)ที่ต้องการ (2) จำนวนแรงเคลื่อนไฟฟ้าของตัวประจุที่กำหนดไว้ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างแผ่นของตัวประจุที่มีค่าสูงมากเกินไป จะทำให้ไดอีเล็คตริกของมันแตกออกจากกัน ทำให้เกิดการอาร์ค (Arcing) ขึ้นในระหว่างแผ่น ซึ่งจะทำให้ตัวประจุลัดวงจรและยอมให้กระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่านตัวมันได้ จึงทำให้เกิดอันตรายต่อส่วนอื่น ๆ ของอุปกรณ์ที่ต่อกับมัน ตัวประจุทั้งหลายจะมีอัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก

แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้เรงงาน (Working voltage) ของตัวประจุเป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทำงานได้คงที่ โดยไม่เกิดอันตรายจากการอาร์ค แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานขึ้นอยู่กับ (1) ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นไดอีเล็คตริก และ (2) ความหนาของไดอีเล็คตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้า ของตัวประจุเป็นตัวประกอบอย่างหนึ่ง ในการพิจารณาหาค่าประจุ เพราะว่าการประจุจะลดลงเมื่อความหนาของไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตัวประจุที่ทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงๆ จะมีไดอิเล็กตริกหนา พื้นที่ของแผ่นจะต้องมาก เพื่อทำให้การประจุเท่ากับตัวประจุที่ใช้กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งมีไดอิเล็กตริกบาง อัตราทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) เพราะว่าการสูญเสียต่าง ๆ และผลของความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

ตัวประจุที่มีความปลอดภัยกับไฟฟ้ากระแสตรง 500 โวลท์ นั้นจะไม่มีความปลอดภัย เมื่อนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีค่าที่วัดได้ ของมันมีค่า 500 โวลท์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 707 โวลท์ ดังนั้นตัวประจุไฟฟ้าที่ใช้จะต้องมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานถึง 750 โวลท์ การเลือกตัวประจุนั้นควรจะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าใช้งานที่มีค่าสูงกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายให้มันอย่างน้อยประมาณ 50 เปอร์เซนต์ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ และกิริยาของตัวประจุไฟฟ้ากระแสสลับ

## วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

**( Alternating current circuit containing only capacitance )**

ตัวประจุไฟฟ้า (Capacitor) นั้นประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นมีฉนวนกั้นกลางเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นตัวนำถึงกันและเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงให้ระหว่างตัวนำทั้งสอง ในช่วงเริ่มแรกนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอย่างรวดเร็ว โดยมันจะทำให้ electron เคลื่อนที่จากแผ่นบวกไปเพิ่มให้กับแผ่นลบ จึงทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองได้รับประจุไฟฟ้า จนทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเท่ากับของแหล่งกำเนิด ภายหลังจากนี้ก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้นั้นมีค่าคงที่อยู่ที่เดิม

ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าลดลง จำมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรก จึงทำให้ประจุไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำทั้งสองลดลง หรือถ้าปลดตัวประจุไฟฟ้าออกจากแหล่งกำเนิด แล้วทำให้แผ่นทั้งสองสัดถึงกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับทิศทาง จนกระทั่งแผ่นตัวนำทั้งสองไม่มีประจุไฟฟ้า

คุณสมบัติที่ทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าในตัวประจุไฟฟ้า เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวมันเปลี่ยนไปนี้เรียกว่าการประจุไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นฟาราด ตัวประจุไฟฟ้าจะมีการประจุไฟฟ้า 1 ฟาราด เมื่อมันได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลท์ แล้วทำให้เกิดประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ ขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองของมัน ฟาราดเป็นหน่วยใหญ่เกินไปไม่เหมาะในงานปฏิบัติ ดังนั้นค่าการประจุไฟฟ้าจึงมีหน่วยทั่วไปเป็นไมโครฟาราด หรือ ไมโครไมโครฟาราด (pF)

หน่วยฟาราดนั้นอาจมีนิยามอีกอย่างคือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลท์ ต่อวินาทีระหว่างตัวประจุไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น 1 แอมแปร์ ตัวประจุตัวนี้จะมีค่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุไฟฟ้า 1 ฟาราด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในตัวประจุจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างตัวมันนั่นคือ

$$Iave = C\ Em / t \qquad 2\text{-}5$$

เมื่อ Iave = ค่าเฉลี่ยของไฟฟ้าเป็นแอมแปร์

C = Capacitance เป็นฟาราด

Em = ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเป็นโวลท์ในเวลา t

t = เวลาเป็นวินาที

จากสมการ 3-5 นั้น ถ้าค่ากระแสไฟฟ้าชั่วขณะก็จะได้ดังนี้ คือ

$$i = C * \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า}$$

$$i = C\ de / dt \qquad 2\text{-}6$$

เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับให้กับตัวนำทั้งสองของ capacitor ดังรูปที่ 2-13 ( C ) จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านวงจร ซึ่งในตอนแรงเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นการ charging ของแผ่นตัวประจุไฟฟ้าในทิศทางหนึ่ง แล้วก็ discharging ออกไป เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง และมันจะรับประจุไฟฟ้าอีกแต่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับในตอนแรก ทั้งนี้เพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทางลบ ในรูปที่ 2-13 (A) นั้นเป็นรูป sinewaveของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ด้านกลับของตัวประจุไฟฟ้าของรูปที่ 2-13 (A) ที่จุดเริ่มต้นของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นไปในทางบวก ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด และที่จุดของ curve แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงสุด อัตราการเปลี่ยนแปลงของมันจะเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาต่อเนื่องกันไปตลอด cycle จะได้ curve ของกระแสไฟฟ้า และจะเห็นได้ว่ามันนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม $90^\circ$ ดังนั้นถ้าพิจารณาเป็นค่าชั่วขณะก็จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

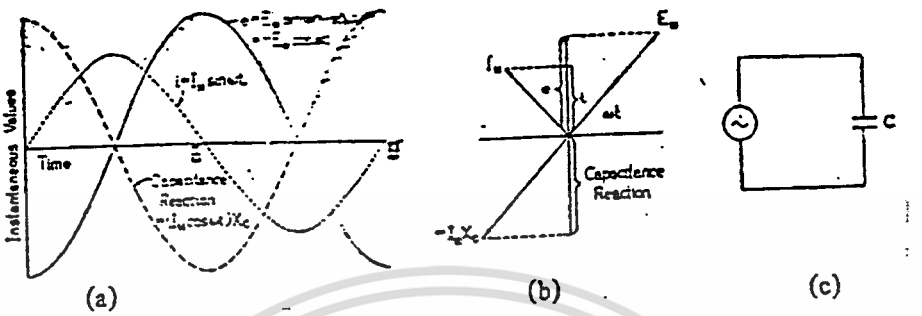
$$I = Im\ Sinwt$$

$$e = Em\ Sin(wt - 90^\circ) = - Em\ coswt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$i = Im \sin \omega t$

$e = Em \sin(\omega t - 90^\circ) = -Em \cos \omega t$




รูปที่ 2-12 Curve and Vector ในวงจรการประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นมุม $90^\circ$

เนื่องจาก e เปลี่ยนจาก 0 เป็น Em หรือในทางตรงกันข้ามที่เกิดขึ้นในหนึ่ง cycle จะเปลี่ยนถึง 4 ครั้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยเฉลี่ยแล้วจะเท่ากับ Em / 1/4 f = 4 fEm โวลท์ต่อวินาที ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการ 2-5 แล้วจะได้

$$Iave = C\ Em / 1/4\ f = 4fEm$$

$$Im = Iave / 2/\pi = 4\ fCEm/2 = 2\pi\ fCEm$$

หรือ $$I = 2\ \pi fCE$$

$$E/I = 1 / 2\pi fC \qquad 2\text{-}7$$

ปริมาณ $1 / 2\pi fC$ นั้นเรียกว่าความต้านเนื่องจากการประจุไฟฟ้า (capacitive Reactance) มีหน่วยเป็นโอห์ม $X_c$ เป็นสัญญลักษณ์ ดังนั้น

$$X_c = E / I$$

$$X_c = 1 / 2\ \pi\ fc \qquad 2\text{-}8$$

ในรูปที่ 2-13 (B) นั้นเป็นรูป vector ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรที่มีการประจุไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งจะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับของการประจุไฟฟ้าเขียนห่างไปจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้ $180^\circ$ และกระแสที่จ่ายให้แก่วงจร $90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**กำลังไฟฟ้าที่มีการประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว**

**( Power in a circuit containing only capacitance )**

Curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะของวงจรที่มีการประจุไฟฟ้าอย่างเดียวได้จากผลคูณของค่าชั่วขณะของกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่าเป็น i = Im Sinwt แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น c = -Em coswt curve ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ จะมีค่าเป็น

$$P = ic = -Em\ Coswt * Im\ Simwt\ t$$

$$= -Em\ Im\ (Sinwt\ Coswt)$$

$$= -Em\ Im\ /2 * Sinwt \qquad 2\text{-}9$$

ในรูปที่ 2-14 curve เส้นเต็มใช้แทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร curve เส้นไข่ปลาเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้า $90^{\circ}$ และ curve เส้นขาดเป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะซึ่งจะเห็นว่า curve ของกำลังไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นสองเท่าและค่าทางด้านบวกและเท่ากับด้านลบ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวัตต์ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์หรือคำนวณจากสูตรกำลังไฟฟ้า คือ

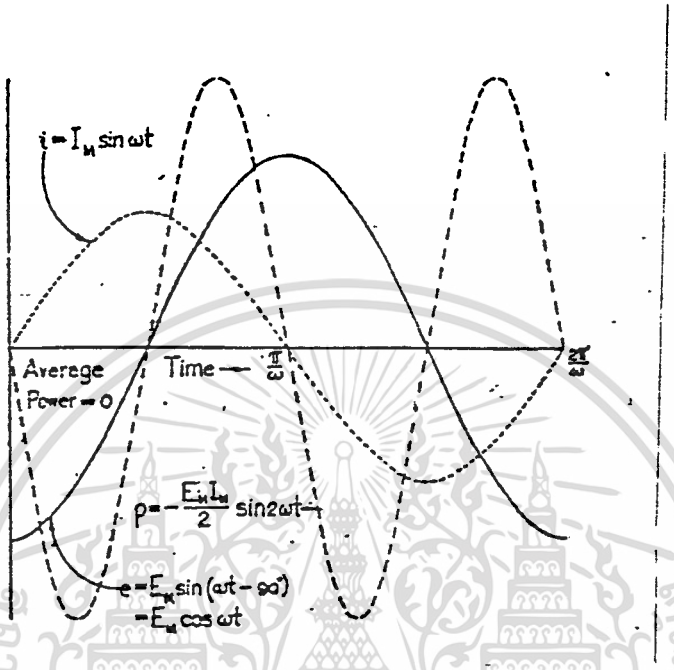
$$P = Ei\ coswt = Ei \cos 90^{\circ} = 0$$

ที่แสดงให้เห็นว่า ในวงจรที่สมมุติไม่มีความต้านทาน (resistance) จะไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นความร้อนเลย และตัวประจุไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานกลับคืนไปในระหว่าง 1 ใน 4 ของไซเกิลจากที่ได้สะสมไว้เป็น 1 ใน 4 ของไซเกิลก่อน พลังงานที่สะสมไว้นี้คำนวณค่าได้จาก

$$W = 1/2\ CE^2 \text{ จูล} \qquad 2\text{-}10$$

เมื่อ C ค่าประจุไฟฟ้าเป็นฟาราด E แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นโวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2-14 เดอฟีกำลังไฟฟ้าของวงจรที่มีค่าประจุไฟฟ้าอย่างเดียว ค่าที่อยู่บนแกนจะเก่า กับค้านล่าง แสดงว่าวงจรเก็บและจ่ายพลังงาน ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าจึงเท่ากับศูนย์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วงจรออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์ มีความหมายในตัวเองแปลว่าสิ่งที่แกว่งไปแกว่งมา สำหรับในกรณีของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ออสซิลเลเตอร์มีความหมายถึงการเปลี่ยนไปมาของแรงดันหรือกระแสระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด หรืออาจกล่าวได้ง่ายๆก็คือ เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนั่นเอง

วงจรออสซิลเลเตอร์ส่วนใหญ่จะให้สัญญาณรูปซายน์ ดังนั้นวงจรออสซิลเลเตอร์จึงถูกนำมาใช้งานในวงจรเครื่องส่ง วงจรสร้างสัญญาณเสียงดนตรี วงจรในเครื่องมือพวกสร้างสัญญาณเสียงและเป็นวงจรต้นกำเนิดสัญญาณความถี่ต่างๆ นอกจากนี้วงจรออสซิลเลเตอร์ยังเป็นวงจรในส่วนประกอบย่อยของวงจรอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก

การกำเนิดสัญญาณด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์มีได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีลักษณะสำคัญพิเศษอื่นๆประกอบด้วย เช่นให้ความถี่ต่ำๆดี หรือให้ความถี่สูงๆดี เสถียรภาพทางความถี่ดี การปรับความถี่เป็นไปได้ยากหรือง่ายเป็นต้น ดังนั้นเราจะกล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วๆไปที่มีใช้อยู่ในวงจรอิเล็กทรอนิกต่างๆ

### หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ก็คือวงจรขยายชนิดหนึ่งนั่นเอง แต่เป็นวงจรขยายชนิดป้อนกลับและที่สำคัญคือการป้อนกลับของสัญญาณจะมิได้ป้อนกลับในลักษณะลบเหมือนกับวงจรขยายป้อนกลับ

เพื่อให้เข้าใจว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ทำงานได้อย่างไร ลองมาดูกันว่าถ้าให้สัญญาณขนาดเล็กๆป้อนเข้ามาทางอินพุตของวงจรขยาย สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จะกลับเฟสแล้วมาเสริมกับอินพุตของวงจรขยายทำให้อินพุตมีขนาดเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เอาท์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย เมื่อป้อนกลับเข้ามาเสริมอีกก็จะทำให้เอาท์พุตได้ใหญ่ขึ้นอีกอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยปกติการเพิ่มขึ้นของสัญญาณจะถูกจำกัดที่ค่าแรงดันค่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อป้อนกลับมาแล้วก็เสมือนกับการป้อนกลับด้วยค่าแรงดันคงที่ วงจรจึงให้เอาท์พุตได้ที่ระดับแรงดันเสมือนกับคงที่คือการออสซิลเลทนั่นเอง

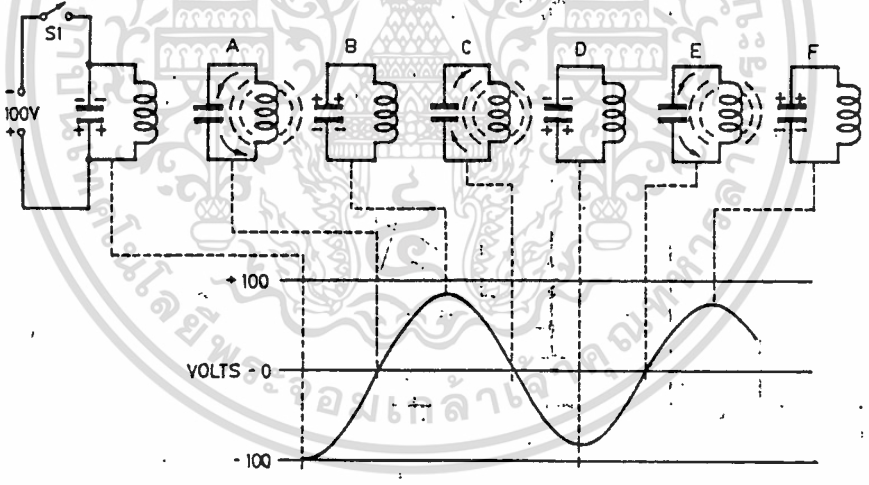
การออสซิลเลทหรือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุตจากค่าต่ำสุดไปจนถึงค่าสูงสุด มักจะเกิดการเปลี่ยนในลักษณะคลื่นรูปซายน์ ความถี่ของรูปคลื่นสามารถคำนวณหาได้จากค่าคงตัวของอุปกรณ์ต่างๆภายในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปที่ใช้งานกันอยู่จะมีการออสซิลเลทได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องมีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปเลยแม้แต่น้อย ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลทในขณะเริ่มต้นนั่นคือสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ภายในอุปกรณ์นั้นแล้ว การออสซิลเลทจะเกิดขึ้นตลอดเวลาเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟตรงเลี้ยงวงจร

วงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปมักจะมีการออสซิลเลทที่ความถี่เดียว ทั้งนี้เพราะวงจรป้อนกลับที่สัญญาณจากเอาท์พุตมายังอินพุตมักจะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์จำพวก R, L และ C ซึ่งก็เป็นที่แน่นอนว่าอุปกรณ์ L และ C ย่อมมีผลทางด้านเฟส นั่นคือการมีความถี่ที่เป็นผลทำให้เฟสที่ได้ทำการเสริมกับอินพุตเกิดการออสซิลเลทหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือสัญญาณเอาท์พุตเมื่อผ่านวงจรป้อนกลับแล้วจะเป็นผลทำให้ผลคูณของ Av เดิมกับค่า β ของวงจรป้อนกลับมีค่าเป็น 1 พอดี

วงจรออสซิลเลทเราอาจจะอธิบายด้วยหลักการในการประจุและคายประจุให้กับตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำโดยพิจารณารูปที่ 3-1




**รูปที่ 3-1 แสดงการเกิดรูปซายน์ที่เอาท์พุตของวงจรรีโซแนนซ์**

สัญญาณที่ผ่านวงจรจูนจะได้รูปซายน์อีกครั้งได้อย่างไร ถ้าเราสมมติว่าวงจรจูนที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในลักษณะขนานกันโดยต่อผ่านสวิทช์เข้ากับแรงดันไฟเลี้ยง 100 โวลท์ ถ้าให้สวิทช์ปิดวงจรเพื่อประจุให้ตัวเก็บประจุจนมีแรงดันคร่อมมัน 100 โวลท์ ครั้นเมื่อเปิดสวิทช์ $S_1$ โดยทันทีทันใด ตัวเก็บประจุจะคายประจุทันทีทันใดเช่นกันโดยผ่านทางตัวเหนี่ยวนำ การไหลของประจุจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่ตัวเหนี่ยวนำนั้น สนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นและจะสะสมพลังงานไว้ในตัวมัน

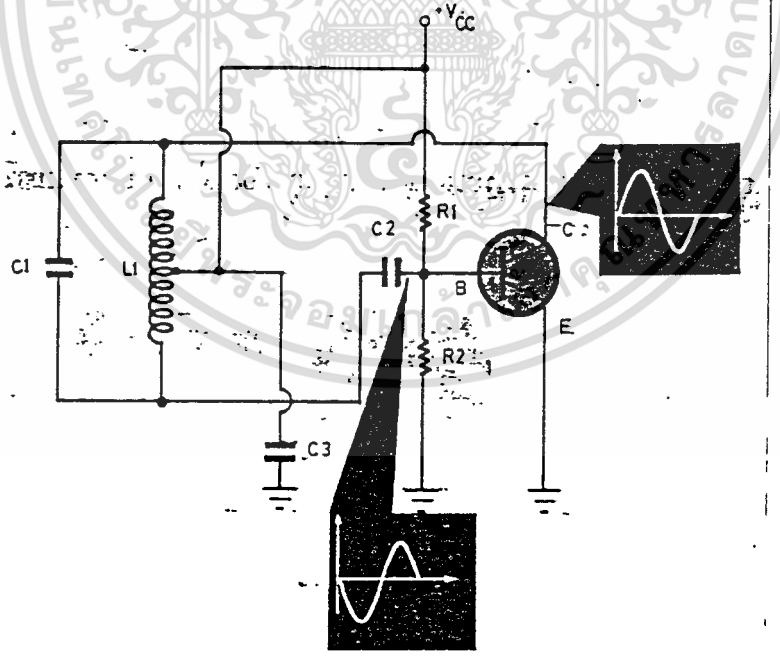
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจนแรงดันคร่อมที่ตัวมันมีค่าเป็น 0 แล้วพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูงสุดพร้อมที่จะถ่ายทอดให้ตัวเก็บประจุใหม่ การประจุครั้งนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามทำให้แรงดันตกคร่อมกับขั้วใหม่และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกือบมีค่าเป็น 100 โวลท์ เมื่อพลังงานในตัวเหนี่ยวนำคายหมดแล้ว แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงสุดพร้อมที่จะคายประจุกลับไปใหม่อีกครั้ง ดังนั้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะลดลงมาเป็น 0 ใหม่วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ระดับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุค่อยๆลดลงเรื่อยๆทั้งนี้เนื่องจากมีพลังงานบางส่วนเกิดการสูญเสียในตัวเก็บประจุ ความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานของวงจรนี้ด้วย

จะเห็นได้ว่าหากไม่มีการกระตุ้นเพิ่มเติมตลอดไปแล้ว การออสซิลเลทที่วงจรจูนจะเกิดขึ้นแล้วค่อยๆลดลงจนกระทั่งหายไปแต่สำหรับวงจรขยายย่านความถี่วิทยุจะมีการกระตุ้นโดยกระแสจากคอลเล็คเตอร์เป็นตัวให้ประจุกับตัวเก็บประจุอยู่เป็นช่วงๆตลอดเวลา ดังนั้นการออสซิลเลทจึงมีเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปเรื่อย เอาท์พุตจึงได้รูปซายน์ที่มีขนาดสม่ำเสมอตลอดเวลาได้

## วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น

วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ทรานซิสเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3-2




รูปที่ 3-2 วงจรออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรออสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 3-2 นี้มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า วงจรฮาร์ทเล่ย์ออสซิลเลเตอร์ การทำงานของวงจรอาศัยหลักการป้อนกลับด้วยวงจรรีโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ $C_1$ และตัวเหนี่ยวนำ $L_1$ สัญญาณป้อนกลับจากเอาท์พุทของขาคอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะป้อนกลับวงจรจูน เมื่อกลับเฟส 180 องศา ป้อนเข้ามาขาเบสของทรานซิสเตอร์

สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ จะเป็นตัวไบแอสทรานซิสเตอร์ให้ทำงานในลักษณะวงจรขยายสัญญาณ ส่วนตัวเก็บประจุ $C_2$ เปรียบเสมือนเป็นตัวกับปลิ้งสัญญาณเข้ามาทางอินพุต โดยปกติวงจรขยายชนิดขาอิมิตเตอร์ร่วมนั้น สัญญาณเอาท์พุตที่ได้ทางขาคอลเล็คเตอร์ จะมีทิศเฟสตรงข้ามกับสัญญาณทางอินพุตอยู่แล้วคือมีทิศทางเฟสต่างกัน 180 องศา ผลของสัญญาณป้อนกลับจะมีทิศทางในทางเสริมกับสัญญาณอินพุททันที วงจรก็จะออสซิลเลทได้

การทำงานในแต่ละรอบของการออสซิลเลทพอจะอธิบายได้ดังนี้ ในขณะเริ่มแรกของการออสซิลเลทจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเล็คเตอร์ซึ่งเป็นผลป้อนกลับมาทางด้านอินพุททางเบส กระตุ้นที่เบส โดยถ้ากระแสของคอลเล็คเตอร์เพิ่มขึ้นทางค่ามากจะทำให้แรงดันที่คอลเล็คเตอร์ลดลง การป้อนกลับจะกระตุ้นเข้ามาที่เบสด้วยค่าแรงดันน้อยลงเป็นผลทำให้กระแสลดลงและแรงดันคอลเล็คเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะสูงขึ้นเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

ตัวเก็บประจุ $C_3$ ของวงจรตามรูปที่ 3-2 เป็นทางผ่าน ( Bypass ) ของสัญญาณไฟสลับและในทำนองเดียวกันก็จะเป็นตัวกั้นแรงดันไฟตรงเพื่อไม่ให้ลัดลงกราวด์ ความถี่ของวงจรได้จากความถี่รีโซแนนซ์ของ $L_1$ และ $C_1$ ซึ่งสามารถปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ได้ด้วยการปรับค่าของ $L_1$ และ $C_1$ นั่นเอง

สมการของการหาค่าความถี่จะเป็นดังนี้

จากสูตร

$$f_{osc} = 1 / 2\pi(L_1.C_1)^{1/2}$$

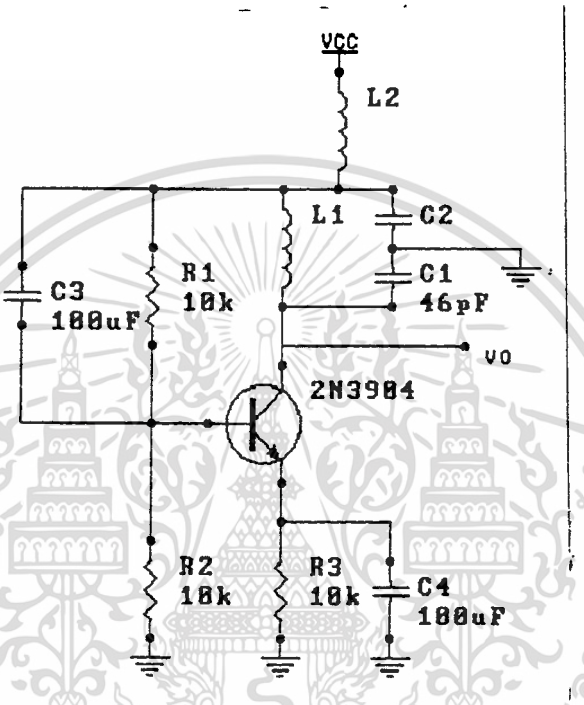
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# หลักการออกแบบและการทำงาน

## วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ ( LC Colpitts Oscillator )

วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ ( LC Colpitts Oscillator ) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4-1




รูปที่ 4-1 วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์

วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์แตกต่างจากวงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ ในส่วนของลักษณะการต่อวงจรรีโซแนนซ์ ( Resonance ) ของวงจรป้อนกลับ ในวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ใช้ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็นสองตัว หรือกล่าวได้ว่าวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์มีลักษณะพิเศษในเรื่องการแท็ปที่ตัวเก็บประจุแทนที่จะเป็นตัวเหนี่ยวนำ แรงดันป้อนกลับจะปรากฏตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C_2$ หรือระหว่างเบสหรือกราวด์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C_2$ จะมีเฟสต่างจากแรงดันที่คอลเลคเตอร์ 180 องศา นั่นคือ สัญญาณจะมีลักษณะมีเฟสตรงกับสัญญาณที่เบสของทรานซิสเตอร์ ปริมาณของแรงดันเอาท์พุทที่ป้อนกลับมายังอินพุทหาได้จากค่าของตัวเก็บประจุ $C_1$ และ $C_2$ โดยปกติค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ $C_2$ ควรจะมีค่าน้อยกว่าค่ารีแอกแตนซ์ของ $C_1$ หรือกล่าวได้ว่าตัวเก็บประจุ $C_1$ ควรจะมีค่าความจุน้อยกว่าตัวเก็บประจุ $C_2$ นั่นเอง

ความถี่ของวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$f_{osc} = 1/(2\pi\sqrt{C_T L})$$

เมื่อค่า $C_T$ คือผลรวมของตัวเก็บประจุ $C_1$ และ $C_2$ หรือ $C_T = C_1.C_2 / C_1+C_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วงจร Analog to Digital (ADC)**

**ทฤษฎี**

ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปของ D/A และ A/D จะมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากเมื่อเราสามารถนำสัญญาณ Digital เปลี่ยนเป็น Analog ได้แล้ว ในทางกลับกันก็ควรจะเปลี่ยนสัญญาณ Analog เป็น Digital ได้ด้วย ซึ่งในจุดนี้จะทำให้เราทำการอ่านค่าข้อมูลทาง Analog ได้ เช่น ค่าความดัน, ค่าอุณหภูมิ โดยจะมีประโยชน์อย่างมากต่องานทางด้านวิศวกรรม

คุณสมบัติของ A/D จะมีลักษณะเหมือนกับ D/A และจะมีคุณสมบัติพิเศษอีก 1 อย่างคือ Conversion Time ดังนี้หมายถึงช่วงเวลาที่ A/D ใช้ในการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ได้ 1 ค่า A/D ที่ดีควรมี Conversion Time น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้

**วงจร Digital to Analog**

**ทฤษฎี**

ไมโครโปรเซสเซอร์จะมีการทำงานในเชิงของ Digital เสมอ ซึ่งมีระดับสัญญาณเป็น 0 และ 1 แต่ในการประยุกต์ใช้งานจริง มักจะต้องเกี่ยวข้องกับสัญญาณที่เป็น Analog ซึ่งสัญญาณที่มีความแตกต่างหลายระดับ สัญญาณเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน, น้ำหนักเสียง ในทางอิเลคทรอนิคส์เราสามารถเปลี่ยน Voltage ให้อยู่ในรูปของสัญญาณเหล่านี้ได้ และระบบคอมพิวเตอร์ก็ต้องเปลี่ยนสัญญาณ 0 และ 1 ให้เป็นสัญญาณ Voltage ได้เช่นกัน ซึ่งสัญญาณ 0 และ 1 นี้ ไมโครจะอยู่ในรูปของข้อมูลทางคอมพิวเตอร์

**คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของ D/A จะกล่าวถึงเป็นข้อ ๆ ดังนี้**

1. Resolution คือ ความสามารถในการแบ่งแยกระดับของสัญญาณหรืออีกนัยหนึ่งก็คือจำนวนบิตของสัญญาณ Digital นั่นเอง เช่น ขนาด 8 บิต จะหมายความว่า สามารถแยกสัญญาณ Digital ได้เป็น 256 ระดับ ($2^8$) ถ้าขนาด 12 บิต ก็จะแยกสัญญาณได้เป็น 4096 ตามระดับ ($2^{12}$) ค่า Resolution บางครั้งก็จะแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซนต์ โดยขนาด 8 บิต จะมีค่าเท่ากับ 100/256 คือ 0.39 %

2. Full Scale Output Voltage คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่จะเป็นไปได้ของสัญญาณ Analog สมมติว่าใช้ D/A ขนาด 8 บิต เราจะเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$V_o = V_{ref}\left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \frac{A_4}{16} + \frac{A_5}{32} + \frac{A_6}{64} + \frac{A_7}{128} + \frac{A_8}{258}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A1 ถึง A9 คือสัญญาณ Digital มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ตามข้อมูลในที่นี้ถ้าสมมติ $V_{ref}$ = 2.5V ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้คือ ให้ A1 ถึง A8 = 1 ดังนี้

$$V_O = 5 \times \frac{256}{255} = 4.9612$$

นั่นหมายความว่า สัญญาณ Digital จะมีค่าสูงสุดน้อยกว่า $V_{ref}$ อยู่ 1 ระดับเสียงและในที่นี้แต่ละต่างของแต่ละระดับจะเท่ากัน

$$V_{diff} = 10 = 0.03906 \text{ Volt}$$

3. Accuracy คือ ค่าเปรียบเทียบระหว่าง Volt จริง ๆ ที่ได้กับ Volt ที่กำหนดให้เป็น ถ้า D/A มีคุณสมบัติเป็น 10 V และ +0.015 % Accuracy นั่นหมายถึง D/A ชุดนี้จะมีโอกาสผิดพลาดได้สูงคือ 0.0015 x 10 = 0.015 V ปกติค่า Accuracy ในทางอุดปกติแล้ว ไม่ควรจะมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของระดับสัญญาณ Analog หรือเท่ากับ +1/2 ของบิตที่ต่ำที่สุด (LSB) ในที่นี้คือ 0.039/2 = 0.0195 V

**หลักการทำงานของวงจร A/D**

ไอซี A/D จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณทางดิจิตอล โดยใช้หลักการสุ่มรับสัญญาณอนาล็อกทางอินพุท ( Sampling ) แล้วนำขนาดของสัญญาณอนาล็อกนั้น มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง ของวงจรแล้วจึงเปลี่ยนเป็นค่าข้อมูลแบบดิจิตอล ซึ่งความเร็วในการสุ่มขนาดสัญญาณ (Sampling Rate ) สามารถกำหนดได้จากความถี่ของสัญญาณนาฬิกาของวงจร ซึ่งค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกานี้ สามารถกำหนดได้โดยวงจร R และ C โดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$F=1/(1.1RC)$$

เมื่อ F คือ ความถี่ของการสุ่มขนาดของสัญญาณของไอซี ADC

R คือ ค่าความต้านทานในวงจร

C คือ ค่าความจุในวงจร

**ความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาต์พุทของไอซี ADC**

ดังได้กล่าวแล้วว่าไอซี ADC จะใช้การเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุท กับแรงดันอ้างอิงของวงจรแล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลแบบดิจิตอล ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าค่าของขนาดสัญญาณอนาล็อกอินพุทเท่ากับขนาดของแรงดันอ้างอิง จะได้ข้อมูลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของข้อมูลสูงสุด

- ถ้าค่าของขนาดสัญญาณอนาล็อกอินพุทมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันอ้างอิง จะได้ข้อมูลมีค่าสูงสุด

ซึ่งขนาดของสัญญาณอินพุทของวงจรถูกกำหนดด้วยค่าตัวแปรต่างๆดังนี้คือ

1. แรงดันอ้างอิงของวงจร ( Voltage Reference หรือ Vref/2 )

แรงดันอ้างอิงของวงจรนี้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐานของวงจรเป็นตัวกำหนดความเที่ยงตรงในการเปลี่ยนขนาดของสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งวงจรต้องการแรงดันอ้างอิงมีค่าความเที่ยงตรงสูง เพราะหากแรงดันอ้างอิงของวงจรไม่มีความเที่ยงตรงแน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว การทำงานของวงจรก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย นั่นคือจะส่งผลให้ค่าของสัญญาณดิจิตอลที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุทจะมีขนาดคงที่ก็ตาม

2. สัญญาณอินพุทลบ ( Voltage Input - หรือ VI - )

แรงดันอินพุทลบนี้ เป็นตัวกำหนดค่าอินพุทด้านต่ำของวงจร หรือจุดเริ่มต้นของการตรวจรับสัญญาณอินพุทของวงจรนั่นเอง โดยสัญญาณอินพุทลบนี้สามารถกำหนดได้ให้มีค่าเกินแรงดันอ้างอิงสูงสุดของวงจร ( 2.50 V )

3. สัญญาณอินพุทบวก ( Voltage Input + หรือ VI + )

แรงดันอินพุทบวกนี้ ก็คือค่าแรงดันอินพุทของวงจรนั่นเอง ซึ่งต้องกำหนดให้มีขนาดสูงสุดไม่เกินกว่าค่าที่วงจร ADC รับได้ ซึ่งต้องเป็นค่าแรงดันที่มีค่าอยู่ในช่วงบวกด้วยเนื่องจากไอซี ADC ไม่สามารถรับสัญญาณอินพุทที่มีค่าเป็นลบได้ สัญญาณอินพุทนี้จะมีค่าสูงสุดประมาณ 2 เท่าของแรงดันอ้างอิงโดยมีจุดเริ่มต้นที่สัญญาณอินพุทลบของวงจร และค่าสูงสุดของสัญญาณอินพุทนี้ต้องมีค่าต่ำกว่า +0.5 V ด้วยเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หลักการทำงานของวงจร D/A**

ไอซี DAC จะทำหน้าที่นำข้อมูลอินพุทแบบดิจิตอลมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจร แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาล็อกออกทางเอ้าท์พุท ซึ่งขนาดของสัญญาณเอ้าท์พุทที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของข้อมูลอินพุทแบบเป็นสัดส่วนเชิงเส้น ( Lincar ) โดยขนาดของสัญญาณเอ้าท์พุทนั้น สามารถแบ่งขนาดออกได้เป็นช่วงๆ ( Step ) ตามขนาดของไอซี DAC ที่ใช้ค่า Step นี้จะเป็นตัวแสดงถึงความละเอียดของสัญญาณเอ้าท์พุทของวงจร DAC ในแต่ช่วงของการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อมูลอินพุทว่าเมื่อข้อมูลเพิ่มขึ้น 1 ระดับขนาดของสัญญาณเอ้าท์พุทเพิ่มขึ้นเท่าไหร่ ถ้าไอซี DAC มีจำนวนบิตมาก ค่าความละเอียดก็จะมาก ถ้าไอซี DAC มีจำนวนบิตน้อย ค่าความละเอียดก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย

ซึ่งเมื่อเราทราบว่าไอซี DAC มีค่า Step ทั้งหมดเท่าใดแล้ว ก็สามารถทราบได้ว่าใน 1 Step จะได้ขนาดของสัญญาณเอ้าท์พุทต่อ 1 Step เป็นเท่าใด โดยหาได้จากสูตร

$$\text{Step} = \text{Analog Max} / \text{DAC Step}$$

เมื่อ Step คือ ค่าของขนาดสัญญาณอนาล็อกเอ้าท์พุทต่อ 1 ช่วงข้อมูล

Analog Maximum คือ ค่าของขนาดสัญญาณอนาล็อกเอ้าท์พุทสูงสุดที่ใช้ในวงจร

DAC คือ ค่าของจำนวน Step ของไอซี DAC

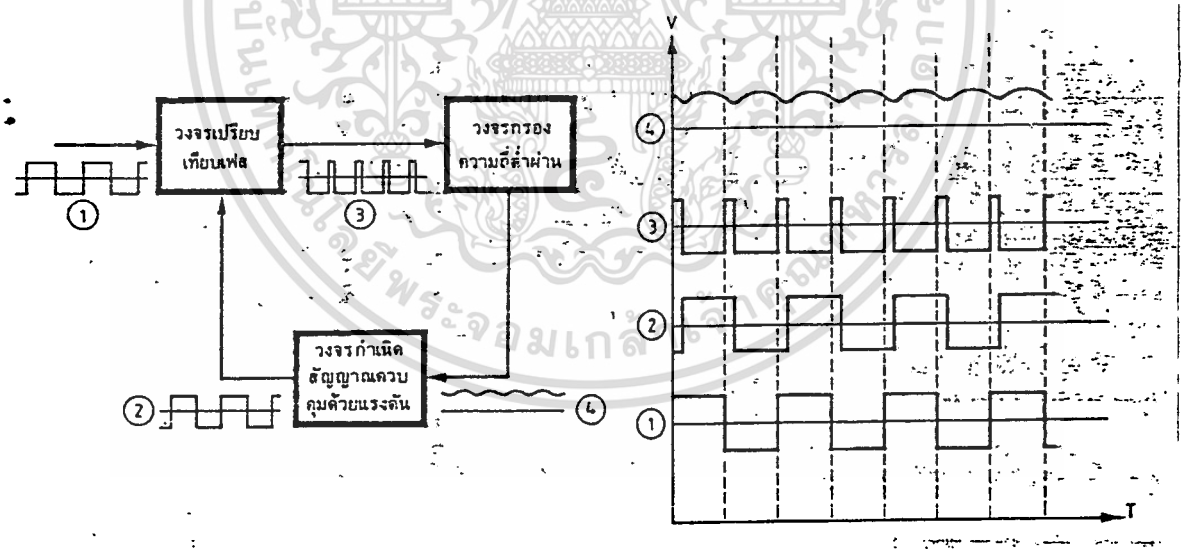
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วงจรเฟสล็อกลูปและวงจรเปรียบเทียบความต่างเฟส

## ( Phase Lockloop and Phase Comparator )

---- ในรูปที่ 4-2 แสดงการทำงานของเฟสล็อกลูป ( PLL ) ซึ่งมีส่วนสำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟส ( Phase Comparator ) ส่วนสร้างความถี่โดยใช้แรงดันควบคุม ( Voltage Controlled Oscillator-VCO ) และส่วนกรองความถี่ต่ำผ่าน ( Low Pass Filter-LPF )

VCO จะผลิตความถี่ออกมาก็ต่อเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อนให้ ( สัญญาณหมายเลข 4 ) ซึ่งแรงดันนี้ถูกสร้างขึ้นจากชุด LPF โดย LPF จะเปลี่ยนความถี่ที่ป้อนเข้ามา ( สัญญาณหมายเลข 3 ) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( สัญญาณหมายเลข 4 ) เพื่อไปควบคุมให้ VCO ผลิตความถี่เอ้าท์พุทของ VCO ( สัญญาณหมายเลข 2 ) จะถูกส่งไปยังอินพุทหนึ่งของส่วนเปรียบเทียบความทต่างเฟส ซึ่งอีกอินพุทหนึ่งของส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟส จะอยู่กับสัญญาณความถี่อ้างอิง ( สัญญาณหมายเลข 1 ) ที่ส่งมาจากภายนอก

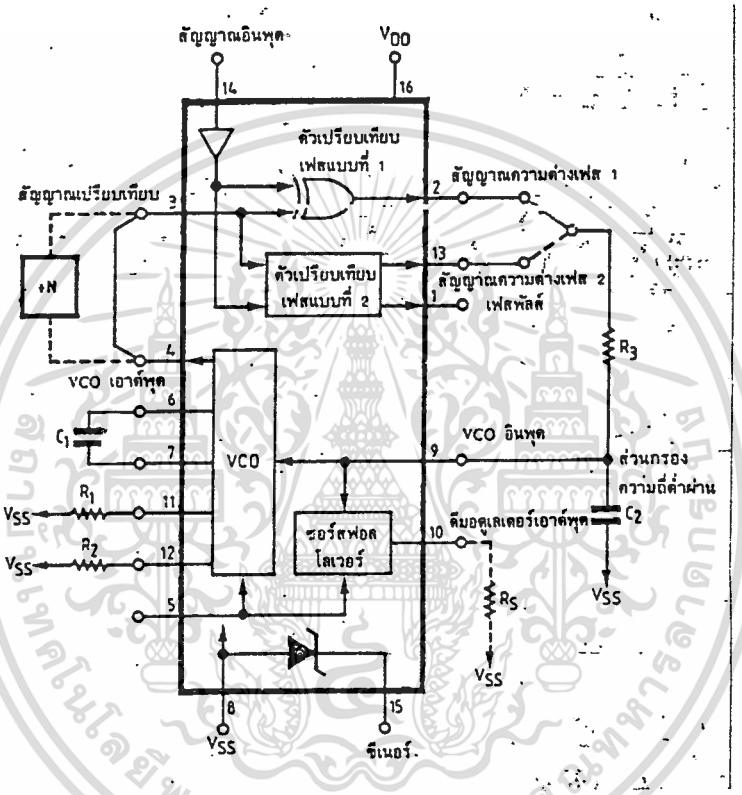



**รูปที่ 4-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานและรูปร่างของสัญญาณตามจุดต่างๆของเฟสล็อกลูป**

เอ้าท์พุทของส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟส ( สัญญาณหมายเลข 3 ) จะเป็นสัญญาณความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุททั้งสอง ซึ่งเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม มีขนาดคงที่และมีความห่างของพัลซ์ ( Mark-Space Ratio ) ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างเฟสของสัญญาณอินพุททั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร LPF ที่ต่ออยู่ตรงเอ้าท์พุทของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟส จะทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ของพัลซ์จากส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟสให้เป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งระดับแรงดันจะเป็นสัดส่วนตามความต่างเฟสของสัญญาณอินพุททั้งสอง แรงดันเอ้าท์พุทของ LPF จะเริ่มคงที่ทันที เมื่อเฟสของสัญญาณอินพุททั้งสองต่างกัน 90 องศา




รูปที่ 4-3 แสดงวงจรภายในและการใช้งานของไอซี CD4046

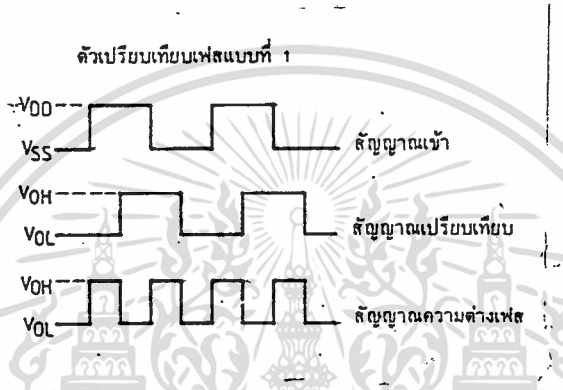
ในรูปที่ 4-3 คือบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของไอซีเบอร์ CD4046 ประกอบด้วยส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟสสองตัวตัวแรกจะใช้เอ็กซ์คลูซีพออร์เกต ( XOR Gate ) เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยเอ้าท์พุทจะเป็น "1" เมื่อสถานะของสัญญาณอินพุททั้งสองนั้นต่างกัน แต่ตัวเปรียบเทียบแบบนี้ไม่เหมาะที่จะใช้ในวงจรนี้ เนื่องจากมีข้อจำกัดตรงที่สัดส่วนของสัญญาณอินพุทต้องสมมาตรกัน และอาจจะล็อกความถี่ได้ง่ายกับฮาร์โมนิคของสัญญาณอินพุท สัญญาณต่างๆของตัวเปรียบเทียบแบบเอกซ์คลูซีพออร์เกตแสดงในรูปที่ 4-4

ตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบที่ 2 นี้มีโครงสร้างที่ค่อนข้างจะซับซ้อนและสมบูรณ์กว่า เนื่องจากตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบนี้จะไม่ไวต่อสัญญาณอินพุทที่ไม่สมมาตร เพราะการทำงานที่ขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

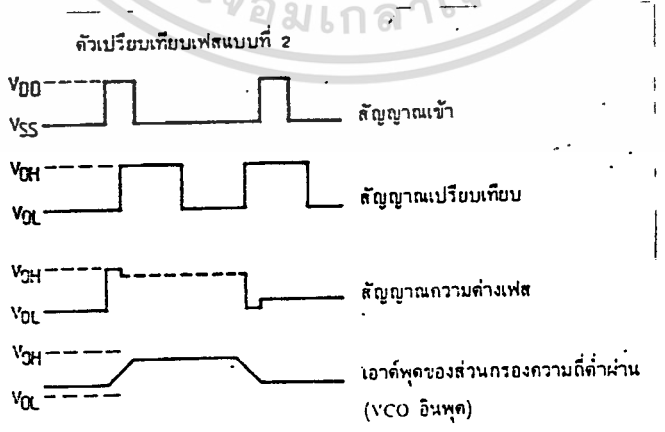
ของสัญญาณ ดังนั้นตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบนี้จึงไม่ลือกความถี่ฮาร์โมนิคของสัญญาณอินพุท สัญญาณต่างๆของตัวเปรียบเทียบแบบที่ 2 นี้แสดงไว้ในรูปที่ 4-5

เอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบที่ 2 นี้เป็นไปได้ 3 สถานะ คือ "0" "1" และสภาวะอิมพีแดนซ์สูง ( High-Impedance ) จะมีสถานะใดนั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุททั้งสองของส่วนเปรียบเทียบความต่างเฟส เมื่อเอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบอยู่ในสภาวะอิมพีแดนซ์สูง จะทำให้ตัวเปรียบเทียบไม่มีผลต่อวงจรเหมือนกับว่าไม่ได้ต่อตัวเปรียบเทียบในวงจรเลย




รูปที่ 4-4 แสดงสัญญาณต่างๆของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบที่ 1

วงจร LPF ที่ต่ออยู่ที่เอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟส จะเปลี่ยนพัลซ์เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งแรงดันนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบมีสภาวะเป็น "1" และจะยังคงค่านั้นอยู่เมื่อเอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบเป็นอยู่ในสภาวะอิมพีแดนซ์สูง แต่ถ้าเอาท์พุทของตัวเปรียบเทียบมีสภาวะเป็นศูนย์แรงดันก็จะลดลงด้วย



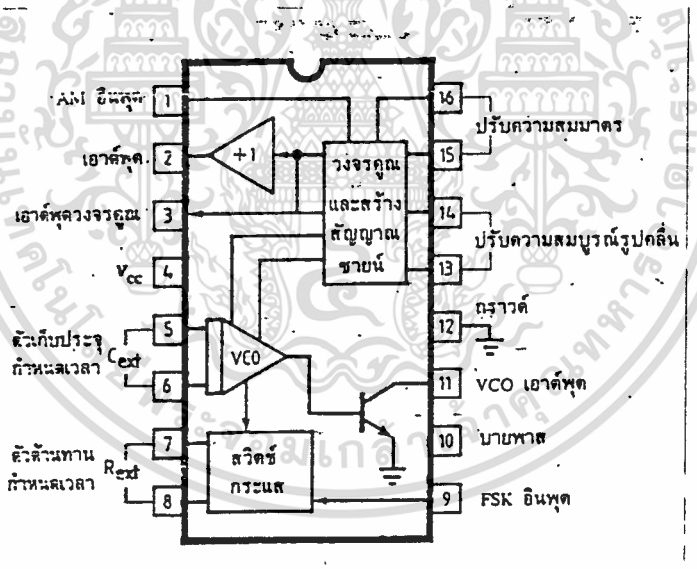

รูปที่ 4-5 แสดงสัญญาณต่างๆของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟสแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาพบว่าแรงดันไฟตรงนี้เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุทของตัวเปรียบเทียบความต่างเฟส แรงดันไฟตรงนี้จะเข้าไปควบคุม VCO ให้ผลิตความถี่ออกมา เมื่อความถี่จาก VCO เท่ากับความถี่อินพุท ความต่างเฟสของสัญญาณจึงมีค่าคงที่ แรงดันไฟตรงที่ไปควบคุม VCO จะคงที่ด้วย ทำให้ความถี่จาก VCO คงที่ไปตลอดจนกว่าความถี่สัญญาณอินพุทจะเปลี่ยนไป

**วงจรโวลท์เตจคอนโทรลออสซิลเลเตอร์ ( VCO Circuit )**

ไอซี XR2206 เป็นโมโนลิธิคฟังก์ชั่นเจนเนอเรเตอร์ ที่สามารถกำเนิดสัญญาณได้ทั้งสัญญาณซายน์เวฟสัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณแรมป์ ( Ramp ) และสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยมีย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 0.01 Hz ถึง 1 MHz วงจรภายในของ XR2206 แสดงอยู่ในรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าภายในของ XR2206 จะมีภาค VCO อยู่ภายในด้วย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของการสร้างสัญญาณต่างๆดีขึ้น และการจัดวงจรจะลดความซับซ้อนลงได้ ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4-7




**รูปที่ 4-6 วงจรภายในของไอซี XR2206**

การทำงานของ XR2206 ในการสร้างสัญญาณซายน์ เริ่มต้นด้วยการที่จะตรวจสอบว่าที่ขา 9 มีสถานะเป็น "1" หรือ "0" ถ้ามีสถานะเป็น "1" ชุดสวิทช์กระแส ( Current Switch ) จะทำให้ความต้านทานที่ขา 7 มีผลต่อวงจร VCO แต่ถ้ามีสถานะเป็น "0" ความต้านทานที่ขา 8 ก็จะมีผลต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VCO แทนความต้านทานที่ขา 7 หรือ 8 นี้ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างขา 5 และ 6 ควบคุมให้ VCO กำเนิดความถี่ออกมาคำนวณได้จากสูตร

$$f = (V_O - V_f) / V_O * C * R \qquad (\text{เฮิร์ตซ์})$$

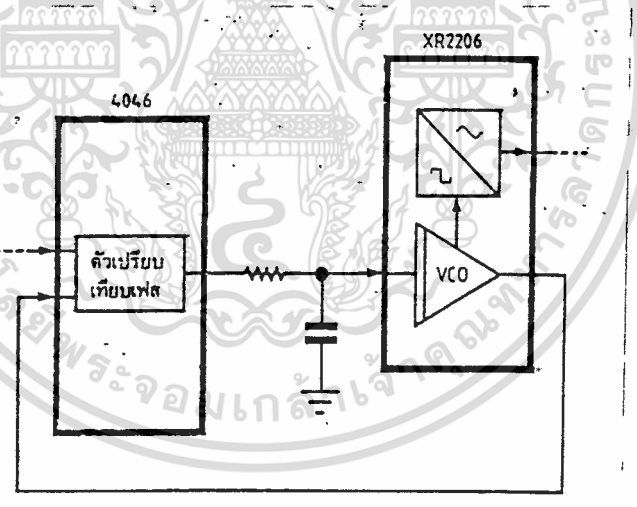
โดย C = ตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างขา 5 และ 6 ( ฟารัด )

R = ตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับขา 7 หรือขา 8 โอห์ม และจากรูปที่ 4-8 จะเห็นว่า

$V_O$ = แรงดันที่ 7 และ 8 (โวลท์ )

$V_O - V_f$ = แรงดันที่ตกคร่อมตัว $R_f$ ( โวลท์ )

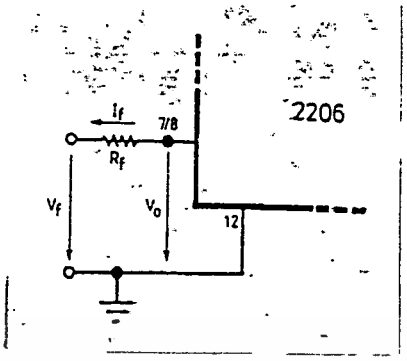
$V_O$ นั้นจะมีค่าคงที่เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงแรงดันตกคร่อม $R_f$ ทำให้เกิดกระแส $I_f$ ผ่านซึ่งเป็นตัวควบคุมให้ VCO ผลิตความถี่ออกมา VCO จะผลิตความถี่ที่แปรผันตรงกับกระแส $I_f$ และ VCO ผลิตความถี่ได้สูงสุด เมื่อกระแส $I_f$ มีค่ามากที่สุด นั่นคือ $V_f = 0$ โวลท์




**รูปที่ 4-7 แสดงการใช้ VCO ของไอซี XR2206 ร่วมกับเปรียบเทียบความต่างเฟส**

ความถี่จาก VCO ส่วนหนึ่งจะส่งไปเข้าภาคเปรียบเทียบความต่างเฟสของไอซี 4046 ตามรูปที่ 6 เพื่อเปรียบเทียบเฟสสัญญาณกับอินพุทอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปเข้าภาคเปลี่ยนรูปร่างสัญญาณภายใน XR2206 เองซึ่งจะทำการเปลี่ยนสัญญาณสี่เหลี่ยมจาก VCO ไปเป็นสัญญาณซายน์ส่งเข้ามาทางอินพุท ขา 2 สัญญาณซายน์เวฟนี้จะสมบูรณ์สวยงามได้ ก็ต้องมีการปรับแต่งกันอีกเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4-8 แสดงการนำตัวต้านทาน $R_f$ มาต่อเพื่อเป็นตัวจัดกระแสควบคุมอินพุทให้กับ VCO ของไอซี XR2206**

โดยการต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ 2 ตัว ตัวหนึ่งต่อไว้ระหว่างขา 13 และ 14 อีกตัวต่อไว้ระหว่างขา 15 กับ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## การทดลองและผลการทดลอง

### วิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุด้วยความถี่รีโซแนนซ์

**( The Resonance Frequency Method )**

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5-1 ได้แสดงวิธีการหาค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุที่นำมาทำการวัดหาค่า เริ่มจากใส่ค่าอินดัคแตนซ์ ( Inductance ) หรือค่าคาปาซิแตนซ์ ( Capacitance ) ที่จะทำการวัดจะถูกใส่เข้าไปในวงจรอาร์แอลซีออสซิลเลเตอร์ ( RLC Oscillator ) เพื่อจะให้วงจรอาร์แอลซีออสซิลเลเตอร์ ( RLC Oscillator ) ผลิตความถี่ขึ้นมา จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิตอล ( Digital ) และจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณอนาล็อก ( Analog ) โดยใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 ซึ่งเป็นไอซีที่แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อนำสัญญาณอนาล็อกที่ได้ไปควบคุมการผลิตความถี่ของวงจรโวลท์เต็จคอนโทรลออสซิลเลเตอร์ ( VCO Circuit ) ให้วงจรโวลท์เต็จคอนโทรลออสซิลเลเตอร์ผลิตความถี่เพื่อมาทำการเปรียบเทียบกับความถี่ที่ผลิตขึ้นจากวงจรอาร์แอลซีออสซิลเลเตอร์ ( RLC Oscillator ) สัญญาณที่ได้กล่าวมานี้เป็นสัญญาณไซน์ ( Sine Wave ) จากนั้นนำมาทำการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ( Square Wave ) และเปรียบเทียบความถี่ระหว่างความถี่ที่เกิดจากวงจรอาร์แอลซีออสซิลเลเตอร์และความถี่ที่เกิดจากเอ้าท์พุทของวงจรโวลท์เต็จคอนโทรลออสซิลเลเตอร์สองสัญญาณว่าเท่ากันหรือไม่ โดยการใช้ไอซีเบอร์ CD4046 ซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบเฟส จะทำการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ

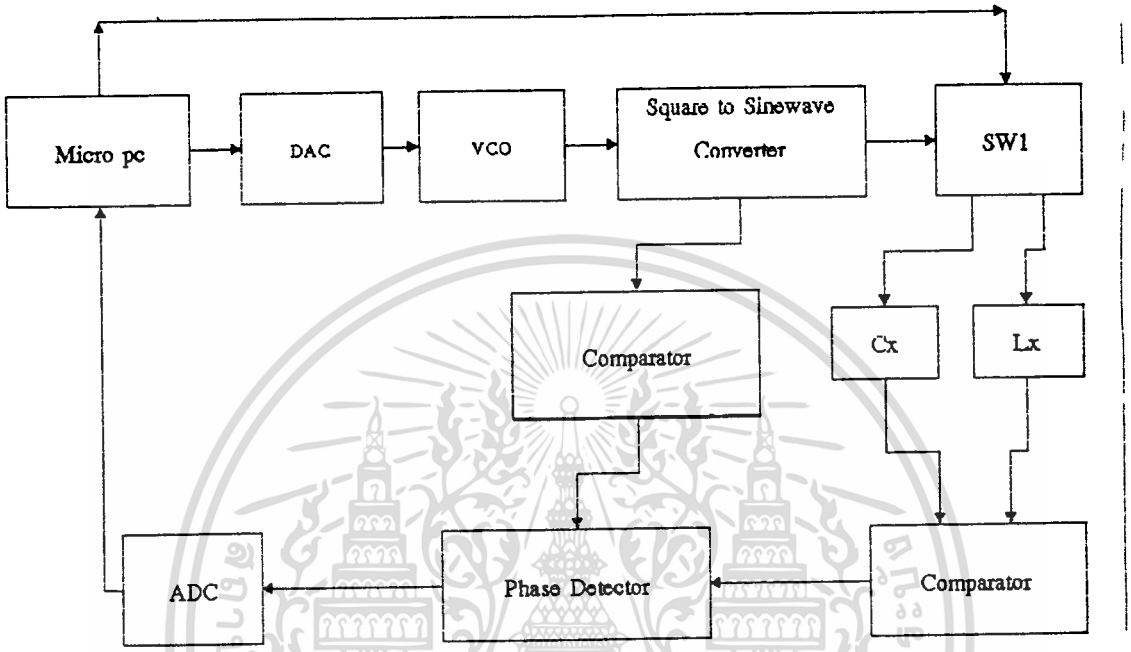
เมื่อสัญญาณ 2 สัญญาณที่ทำการเปรียบเทียบกันแล้ว จากนั้นสัญญาณที่ได้จะผ่านวงจร Low Pass Filter โดยวงจร Low Pass Filter จะสัญญาณดังกล่าวให้เป็นแรงดันไฟตรง ถ้าสัญญาณมีความถี่ไม่เท่ากัน ที่เอาท์พุทของวงจร Low Pass Filter จะมีแรงดันมากกว่า 0V ( >0.27V ) และเมื่อสัญญาณมีความถี่เท่ากัน ที่เอาท์พุทของวงจร Low Pass Filter จะมีแรงดันเท่ากับ 0V ( =0.27V ) แล้วทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุ ด้วยสูตร

$$C = 1/(2\pi f)^2 L$$

$$L = 1/(2\pi f)^2 C$$

ซึ่งข้อมูลที่นำมาคำนวณจะได้มาจากวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล ( A/D Convertor) และทำการหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5-1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทำงานของวงจรเครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์**

จากวงจรในรูปที่ 5.2 เมื่อมีความถี่ของสัญญาณเข้ามาทางอินพุต ผ่าน$C_2$ คัปปลิ้งสัญญาณมาเข้าขา 14 ของ $IC_2$ ขณะเดียวกันก็จะมีสัญญาณสี่เหลี่ยมจากขา 11 ของ $IC_6$ เข้ามาเปรียบเทียบความต่างเฟสกันกับขา 3 ของ $IC_2$ สัญญาณพัลซ์ที่เกิดจากความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองจะถูกส่งออกมาทางขา 13 เข้าไปชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วย $R_4$ ,$R_5$,$R_6$,$C_5$,$D_2$ และ $D_3$ โดย $D_2$ และ $D_3$ จะเป็นตัวควบคุมการประจุและการคายประจุของ $C_6$ ในขณะที่วงจรยังไม่ล็อคความถี่พัลซ์จากขา 13 จะมีความกว้างของพัลซ์มากและช่วงห่างของพัลซ์แต่ละลูกน้อย ดังนั้นเวลาในการประจุและคายประจุของ $C_6$ จึงไม่จำเป็นต้องยาวมาก $D_2$ และ $D_3$ จะทำให้ $R_4$ และ $R_5$ ขนานกัน เพื่อให้ค่าคงตัวเวลาสั้นลง แต่เมื่อวงจรล็อคความถี่ได้แล้วพัลซ์จากขา 13 จะมีความกว้างน้อยและช่วงห่างระหว่างพัลซ์มาก $D_2$ และ $D_3$ จะ OFF ทำให้ $R_4$ ไม่ขนานกับ $R_5$ ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงตัวเวลายาวมากขึ้น

$IC_4$ ทำหน้าที่บัฟเฟอร์สัญญาณจากชุดกรองความถี่ต่ำผ่านไปสู่ $IC_5$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ ขา 3 ของ $IC_5$ เป็นขาแรงดันอ้างอิง 2.5 โวลต์ ถ้าแรงดันที่ขา 2 มีค่าสูงกว่า 2.5 โวลต์ จะทำให้แรงดันที่ขา 6 มีค่าเป็นลบ แต่ถ้าค่าแรงดันที่ขา 2 น้อยกว่า 2.5 โวลต์จะทำให้แรงดันที่ขา 6 มีค่าเป็นบวก แรงดันเอาต์พุทจาก $IC_5$ นี้จะไปควบคุมให้ $IC_6$ ผลิตสัญญาณสี่เหลี่ยมของวงจร VCO ออกมาทางขา 11 เพื่อส่งกลับไปเข้า $IC_2$ ทางขา 3 ทำการเปรียบเทียบเฟสกับสัญญาณอินพุทอีก การวนรอบเช่นนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆจนกว่าเฟสของสัญญาณที่เข้ามาเปรียบเทียบกันที่ $IC_2$ จะต่างกันคงที่ ซึ่งหมายถึงความถี่ของสัญญาณอินพุทกับความถี่ของสัญญาณจาก $IC_6$ มีความถี่เท่ากัน

สัญญาณซายน์ที่ออกมาจากขา 2 ของ $IC_6$ จะผ่านบัฟเฟอร์ $IC_7$ ก่อนจะส่งผ่าน $R_{16}$ และ $C_{14}$ คัปปลิ้งสัญญาณออกทางเอาต์พุตของวงจร $IC_3$ ทำหน้าที่ขับ $LED_1$ ซึ่งแสดงสภาวะในขณะที่ล็อกความถี่ได้แล้ว $C_5$ จะเก็บประจุผ่านทาง $R_3$ จนมีแรงดันตกคร่อมสูงขึ้น เมื่อแรงดันตกคร่อม $C_5$ สูงกว่าแรงดันอ้างอิงที่ขา 2 จะทำให้ $LED_1$ ติดสว่าง ในขณะที่ยังล็อคความถี่ไม่ได้สัญญาณที่ออกมาจากขา 1 ของ $IC_2$ จะเป็นลักษณะพัลส์ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมที่ $C_5$ จะมีการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา จึงทำให้ $LED_1$ เกิดการกระพริบติดๆดับๆ ไดโอด $D_1$ นั้นมีไว้เพื่อให้ $C_5$ ดิสชาร์จได้เร็วขึ้น

$VR_1$ เป็นตัวปรับรูปร่างของสัญญาณซายน์เวฟให้สมบูรณ์ ไม่มีสัญญาณแปลกปลอมปนออกมาด้วย $VR_2$ เป็นตัวปรับให้สัญญาณซายน์เวฟที่ได้มีรูปรางสวยงาม ไม่มีการผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกเกิดขึ้น $VR_{3+}$ เป็นตัวปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ส่าน $S_1$ เป็นตัวเลือกย่านความถี่ที่ต้องการ ถ้า $S_1$ เปิดวงจรจะเป็นย่านความถี่ตั้งแต่ 500HZ-100kHZ

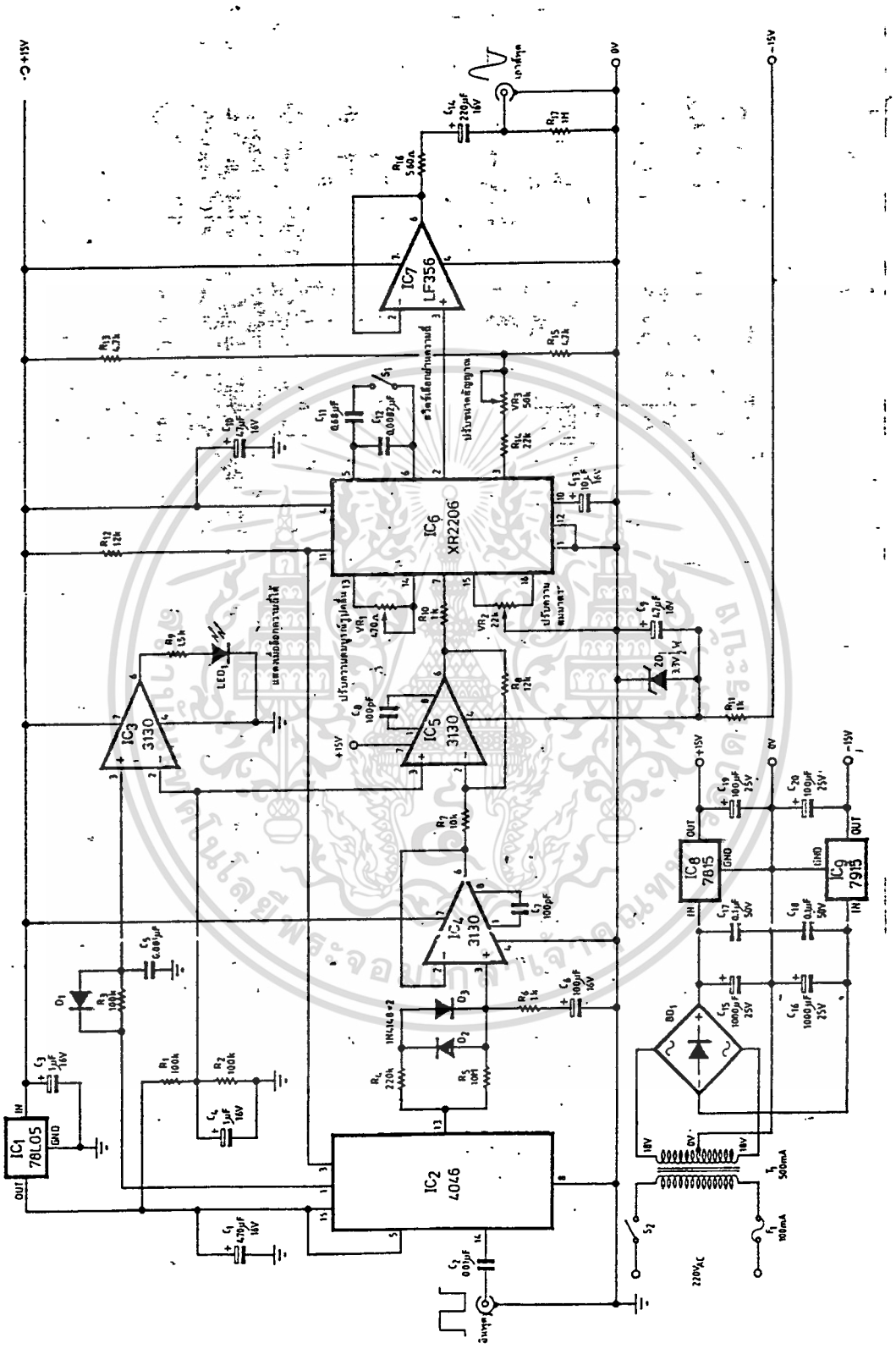
ในภาคจ่ายไฟนั้น ประกอบด้วยหม้อแปลง $T_1$ ขนาด 18-0-18 โวลต์ 150 มิลลิแอมป์ ผ่านบริดจ์เรกติไฟร์ BD, จากนั้นก็ไปเข้า $IC_8$ และ $IC_9$ ทำการเรกูเลตแรงดันออกมาเป็น +15 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ -15 โวลต์ ทางด้าน +15 โวลต์ มี $C_{15}$ เป็นฟิลเตอร์แรงดัน DC จาก $BD_1$ ให้เรียบ โดย $C_{17}$ เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงลงกราวด์ไป ส่วน $C_{19}$ จะช่วยกรองแรงดันจาก $IC_8$ ให้ราบเรียบยิ่งขึ้น ในด้านไฟ -15 โวลต์ ก็เช่นเดียวกับ $C_{16}$ จะเป็นฟิลเตอร์แรงดันให้เรียบ $C_{18}$ เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงลงกราวด์ และ $C_{20}$ เป็นตัวกรองแรงดันจาก $IC_9$ ให้ราบเรียบยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5-2 วงจรสมบูรณ์ของเครื่องวัดไดนามิกคาปาซิแตนซ์และอินดัคแตนซ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

ผลการทดลองของการวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุโดยวิธีของ LC ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งอาศัยความแต่กต่างของความถี่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

| $L_{exp}$(mH) | $L_{cal}$(mH) | L % Error | $f_{exp}$(kHz) | $f_{cal}$(kHz) | f %Error |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.9 | 2.7 | 7.03 | 33.33 | 32.14 | -3.72 |
| 3.75 | 3.88 | -3.53 | 27.78 | 27.59 | 0.68 |
| 5.65 | 5.54 | 1.97 | 23.26 | 22.48 | -3.45 |
| 7.4 | 7.49 | -1.20 | 20.00 | 19.64 | -1.83 |
| 9.1 | 9.39 | -3.23 | 17.86 | 17.71 | -0.83 |

ตารางที่ 1. แสดงการหาค่าความเหนี่ยวนำ ด้วยค่า $C_1$=9.26nF และ $C_2$=97.4nF

| $C_2$(nF) | $C_{cal}$(nF) | C % Error | $f_{comp}$(KHz) | $f_{cal}$(KHz) | f % Error |
|---|---|---|---|---|---|
| 39.95 | 37.65 | 5.76 | 16.90 | 16.81 | -0.56 |
| 50.15 | 46.92 | 6.42 | 16.57 | 16.48 | -0.52 |
| 69.85 | 78.10 | -11.81 | 16.00 | 16.11 | 0.65 |
| 91.35 | 91.93 | -0.63 | 15.87 | 15.88 | 0.03 |

ตารางที่ 2. แสดงการหาค่าความจุ ด้วยค่า $C_1$=0.0094μF และ L=11.78mH

จากผลการทดลองที่ได้นี้ค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุที่ทำการวัดมาได้มีบางตัวพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโครงงานนี้ได้ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลข้อมูลขนาด 8 บิต ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะไม่ละเอียดพอ ถ้าต้องการให้ความผิดพลาดลดลงควรใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลข้อมูลขนาด 16 บิต ซึ่งจะทำให้เกิดความเที่ยงตรงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include<graphics.h>
#include<stdlib.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#define UP 0x4800
#define DOWN 0x5000
#define ENTER 0x1C0D
#define ESC 0x011B
#define F1  0x3B00
void Initialize(void);
void Selectmenu(void);
void Speaker(int f,int t);
void Bbx0(int sx,int sy,int ex,int ey,int c_lt,int c_br,int c_mid);
void Writetext(int sx,int sy,int color,char font,int direct,
     int size,char *text);
void Melody(void);
void Pause(void);
void Information(void);
void Help(void);
void Quit(void);
void Frame(void);
void Capacitance(void);
void DisplayC(void);
void Inductance(void);
void DisplayL(void);
unsigned Logo(void);
unsigned char CalulationC(unsigned char a);
unsigned char CalulationL(unsigned char a);
int Check(int key);
int bb[6]={130,170,210,250,290,330};
int ww[6]={235,225,260,225,280,280};
int begin=0;
char *tt[6]={"CAPACITANCE","INDUCTANCE","MELODY",
    "INFORMATION","HELP","EXIT"};


main()
{
Initialize();
Logo();
Selectmenu();
}



void Initialize(void)
{
int GraphDriver=DETECT,GraphMode,ErrorCode;
initgraph(&GraphDriver,&GraphMode,"");
ErrorCode=graphresult();
if(ErrorCode!=grOk)  {
printf("Graphics system error:%s\n",grapherrormsg(ErrorCode));
getchar();
exit(1);
}
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void Selectmenu(void)
{
int key;
Bbx0(0,0,640,480,9,1,6);
Bbx0(200,130,440,160,8,15,3);
Bbx0(200,170,440,200,15,8,7);
Bbx0(200,210,440,240,15,8,7);
Bbx0(200,250,440,280,15,8,7);
Bbx0(200,290,440,320,15,8,7);
Bbx0(200,330,440,360,15,8,7);
setcolor(0);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(42,75,"Microprocessor-Base Dynamic L/C Meter");
setcolor(15);
outtextxy(37,75,"Microprocessor-Base Dynamic L/C Meter");
Writetext(235,135,14,0,0,2,"CAPACITANCE");
Writetext(225,175,6,0,0,2,"INDUCTANCE");
Writetext(260,215,6,0,0,2,"MELODY");
Writetext(225,255,6,0,0,2,"INFORMATION");
Writetext(280,295,6,0,0,2,"HELP");
Writetext(280,335,6,0,0,2,"EXIT");

do {
key=bioskey(0);
if((key==UP)||(key==DOWN)) {
Check(key);
}

else {
if(key==ENTER) {
switch(begin) {
case 0:Capacitance(); break;
case 1:Inductance(); break;
case 2:Melody();break;
case 3:Information(); break;
case 4:Help(); break;
case 5:Quit();break;
                }
              }
    }
  } while(key!=ENTER);
}

int Check(int key)
{
if(key==UP) {
Speaker(1000,10);
Bbx0(200,bb[begin],440,bb[begin]+30,15,8,7);
Writetext(ww[begin],bb[begin]+5,6,0,0,2,tt[begin]);
begin=(begin==0) ? 5:begin-1;
Bbx0(200,bb[begin],440,bb[begin]+30,8,15,3);
Writetext(ww[begin],bb[begin]+5,14,0,0,2,tt[begin]);
}
if(key==DOWN) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Speaker(1000,10);
Bbx0(200,bb[begin],440,bb[begin]+30,15,8,7);
Writetext(ww[begin],bb[begin]+5,6,0,0,2,tt[begin]);
begin=(begin==5) ? 0:begin+1;
Bbx0(20,bb[begin],440,bb[begin]+30,8,15,3);
Writetext(ww[begin],bb[begin]+5,14,0,0,2,tt[begin]);
   }
}

void Speaker(int f,int t)
{
sound(f);
delay(t);
nosound();
}

void Bbx0(int sx,int sy,int ex,int ey,int c_tl,int c_br,int c_mid)
{
setfillstyle(1,c_mid);
bar(sx,sy,ex,ey);
setfillstyle(1,c_tl);
bar(sx,sy,sx,ey);
bar(sx,sy,ex,ey);
setfillstyle(1,c_br);
bar(sx,ey,ex,ey);
bar(ex,sy,ex,ey);
setcolor(0);
}

void Writetext(int sx,int sy,int color,char font,int direct,
               int size,char *text)
{
settextstyle(font,direct,size);
setcolor(color);
outtextxy(sx,sy,text);
}


void Melody(void)
{
int s[92]={_C2,_C2,_E2,_G2,_G2,_G2,_A2,_G2,_F2,_A2,_G2,_E2,
           _E2,_E2,_F2,_E2,_D2,_D2,_D2,_D2,_E2,_D2,_C2,_C2,
           _C2,_C2,_E2,_G2,_G2,_G2,_A2,_G2,_F2,_A2,_G2,_E2,
           _G2,_A2,_B2,_G2,_D2,_A2,_A2,_B2,_A2,_G2,
       _G2,_A2,_G2,_F2,_D2,_F2,_A2,_G2,_E2,_C2,
           _C2,_C2,_E2,_D2,_D2,_D2,_A2,_B2,_A2,_G2,
           _C2,_C2,_E2,_G2,_G2,_G2,_A2,_B2,_C3,_D3,_E3,
           _D3,_C3,_A2,_G2,_A2,_B2,_C3,_E3,_C3,_D3,_C3,_C3,_C3,_C3,_C3};

int d[92]={3,7,3,10,7,3,7,3,7,3,20,7,
           3,7,3,7,3,12,3,7,3,7,3,17,
           3,7,5,10,7,3,7,3,7,3,20,10,
           7,3,7,3,17,3,5,5,20,10,
           7,3,7,2,20,7,3,7,3,17,
           3,7,5,10,7,3,10,7,3,27,
           3,7,3,10,7,3,5,5,5,5,27,
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            3,7,3,7,3,7,3,7,3,7,3,10,7,3,5};
clearviewport();
setbkcolor(3);
setcolor(15);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(getmaxx()/3-10,getmaxy()/2-40,"Press<Esc> To Menu");
outtextxy(getmaxx()/3-10,getmaxy()/2+20,"Press<F1> To Exit");
settextstyle(0,0,1);
plays(s,d,92);
Pause();
}

void Pause(void)
{
int readkey;
readkey=bioskey(0);
if(readkey==ESC)
{
clearviewport();
setbkcolor(0);
Selectmenu();
}

else if (readkey==F1)
{
settextstyle(0,0,2);
Quit();
exit(0);
  }
}


void Information(void)
{
printf("INFORMATION");
}

void Help(void)
{
printf("HELP");
}

void Quit(void)
{
char ans;
Frame();
ans=getch();
if(toupper(ans)=='Y')
{
closegraph();
exit(0);
}

else if(toupper(ans)=='N')
{
clearviewport();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
setbkcolor(0);
Selectmenu();
  }
}

void Frame(void)
{
clearviewport();
setbkcolor(15);
setfillstyle(1,2);
bar(80,150,520,300);
setfillstyle(1,7);
bar(90,300,520,310);
bar(520,160,530,310);
outtextxy( 100,225,"Are you sure to exit(Y/N)?");
}

unsigned Logo(void)
{
int i;
setfillstyle(1,4);
bar(0,0,639,479);
rectangle(10,10,629,469);
setcolor(12);
setfillstyle(1,7);
bar(11,11,628,468);
rectangle(15,15,624,464);
rectangle(17,17,622,462);
setcolor(1);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(22,25,"King Mongkut Institute of technology");
outtextxy(150,65,"L A D K R A B A N G");
setfillstyle(1,15);
bar(40,160,599,165);
bar(40,160,45,220);
bar(160,390,479,400);
bar(469,240,479,400);
setfillstyle(1,8);
bar(40,215,599,220);
bar(594,160,599,220);
bar(160,240,479,250);
bar(160,240,170,400);
setcolor(8);
outtextxy(75,172,"Microprocessor Dynamic L/C Meter");
rectangle(158,238,482,403);
setcolor(15);
outtextxy(70,170,"Microprocessor Dynamic L/C Meter");
line(40,220,45,215);
line(494,165,599,160);
for(i=0;i<5;i++)
{
line(40,215+i,45-i,215+i);
line(594,160+i,599-i,160+i);
}
for(i=0;i<10;i++);
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
a=inp(512);
CalulationC(a);
outp(513,a);
}
readkey=bioskey(0);
if(readkey==ESC) {
clearviewport();
Selectmenu();
  }
}

unsigned char CalulationC(unsigned char a)
{
float c,C,f;
char Tm[8];
c=(float)a*5/255;
f=(3.06-c)/(3.06*(0.0082e-6)*1e3);
C=0.3/(f*10e3);
C=C*1e9;
DisplayC();
settextstyle(0,0,2);
setcolor(15);
sprintf(Tm,"%.4f",C);
outtextxy(380,225,Tm);
return a;
}

void DisplayC(void)
{
setbkcolor(1);
setcolor(15);
settextstyle(0,0,3);
outtextxy(70,80,"measuring capacitance");
setfillstyle(1,7);
bar(85,300,585,305);
bar(580,155,585,300);
setfillstyle(1,4);
bar(80,150,580,300);
setcolor(14);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(100,225,"capacitance value");
outtextxy(530,225,"nF");
}


void Inductance(void)
{
int i,readkey;
unsigned char a;
clearviewport();
outp(515,144);
while(!kbhit()) {
outp(514,1);
a=inp(512);
CalulationL(a);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
line(160+i,400-i,170,400-i);
line(469+i,250-i,479,250-i);
}
setfillstyle(9,8);
bar(40,115,599,140);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(90,120,"Department of Instrumentation");
setfillstyle(1,4);
bar(169,249,469,390);
settextstyle(DEFAULT_FONT,HORIZ_DIR,1);
outtextxy(210,300,"KHWANCHAI SURACHAI 36.013278");
outtextxy(210,320,"MANOP  MUSIKAPARN 36.013299");
outtextxy(210,340,"SUCHAI   PROMSAK 36.013312");
outtextxy(210,360,"SUTEP PASUVANITKUL 36.013314" );
setcolor(15);
rectangle(39,159,600,221);
rectangle(38,113,601,142);
outtextxy(250,260,"..Presented By..");
setcolor(0);
outtextxy(225,420,"COPYRIGHT (C) April 1994");
if(getch());
{
setfillstyle(9,7);
bar(39,159,600,221);
setfillstyle(1,8);
bar(39,159,600,165);
bar(39,159,45,221);
setfillstyle(1,15);
bar(39,215,600,221);
bar(594,160,600,221);
setcolor(8);
for(i=0;i<7;i++)
{
line(39,215+i,45-i,215+i);
line(594,159+i,600-i,159+i);
}
setcolor(15);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(55,172,"Switch-On to Start Program Now");
settextstyle(0,0,2);
delay(50);
}
clrscr();
return(0);
}


void Capacitance(void)
{
int i,readkey;
unsigned char a;
clearviewport();
setbkcolor(0);
outp(515,144);
while(!bioskey(1)) {
outp(514,1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
readkey=bioskey(0);
if(readkey==ESC) {
clearviewport();
Selectmenu();
  }
}

unsigned char CalulationL(unsigned char a)
{
float L;
char Tm[8];
L=(float)a*5/255;
DisplayL();
settextstyle(0,0,2);
setcolor(15);
sprintf(Tm,"%.4f",L);
outtextxy(400,225,Tm);
}

void DisplayL(void)
{
setbkcolor(1);
setcolor(15);
settextstyle(0,0,3);
outtextxy(70,80,"measuring inductance");
setfillstyle(1,7);
bar(85,300,585,305);
bar(580,155,585,300);
setfillstyle(1,4);
bar(80,150,580,300);
setcolor(14);
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(100,225,"inductance value");
outtextxy(530,225,"H");
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

- โครงงานนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจากอาจารย์หลายๆท่าน คณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆท่าน ในภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ไว้เป็นอย่างสูงไว้ ณ.ที่นี้ด้วย

โครงงานนี้จำเป็นต้องมีการใช้ห้องทดลอง ซึ่งท่านอาจารย์ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมถึงการอำนวยความสะดวกทางด้านสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และต้องขอขอบคุณเพื่อนๆทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจ หากมีข้อบกพร่องและความผิดพลาดของโครงงานนี้ คณะผู้จัดทำขอน้อมรับผิดและขออภัยไว้ ณ.ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

กุมภาพันธ์ 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


1. ยืน ภู่วรวรรณ "ทฤษฎีและการใช้งาน อิเลคทรอนิคส์ เล่ม 2" บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด
2. Henry P.Hall, "An AC-DC ratiometer and Its Use in a CLR Meter",IEEE Trans on Instrument ation and Measurements,Vol IM- 22,No 4,Dec.1973
3. A.Rusek and S.M.Mahmud, "A Microprocessor Based Switched Battery Capacitance Meter", IEEE Trans on Instrumentation and Measurement,Vol IM-37,No.2,June 1988
4. A Rusek and S.M. Mahmud, "A Switched Battery Digital Capacitance Meter",IEEE Trans.on Instrumentation and Measurements,Vol IM-35,No 4 Dec 1986.
5. H.kuhne, "Inductance-Capacitance Meter",Elekto Electronics U.S.A. p.30-34,March 1992



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้