

# บทที่ 1

## ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Theory of electricity and power electronic)

### ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้องเชื่อมโยงเสมอไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิต ดังนั้น ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จึงมีส่วนเกี่ยวข้องด้วยทุกกระบวนการในการดำรงชีวิตประจำวัน

การเรียนรู้เรื่องไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และสามารถทำความเข้าใจได้คือพื้นฐานของไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โดยก่อนอื่นต้องเข้าใจพื้นฐานคุณสมบัติและการทำงานของไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แล้วนำอุปกรณ์เหล่านั้นมาประกอบขึ้นเป็นวงจรต่างๆ จึงจะทำงานได้

### วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้
2. อธิบายวิธีการวัดทางไฟฟ้าได้
3. อธิบายลักษณะการใช้ไฟฟ้าในอาคาร/โรงงานได้
4. อธิบายโครงสร้างค่าไฟฟ้าได้
5. อธิบายวิธีการควบคุมค่าไฟฟ้าได้

### บทนำ (Introduction)

ประโยชน์ของไฟฟ้าต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์โลกมีมากมายมหาศาล ไฟฟ้าช่วยทำให้เกิดการพัฒนาเกิดเทคโนโลยีใหม่ๆ ช่วยอำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิต

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า วงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หน่วยวัดทางไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าเบื้องต้น พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า โครงสร้างค่าไฟฟ้า ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (Ft)

## 1.1 การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า วงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หน่วยวัดทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส กำลังงาน และ พลังงาน ตลอดจนอุปกรณ์ไฟฟ้าเบื้องต้น เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

มนุษย์เริ่มค้นพบประจุไฟฟ้าจากการนำเอาแท่งอำพันมาถูกับขนสัตว์ทำให้เกิดประกายไฟ นอกจากนี้เริ่มมีการสังเกตจากการหิวหม ซึ่งขณะที่หิวหมนั้นเกิดการดูดเส้นผมเสมือนมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น มนุษย์เริ่มค้นเคยและรู้จักการนำไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์เมื่อราวปี พ.ศ. 2397 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ ไชน์ริส เกอบเบิลได้ค้นพบหลอดไฟฟ้าชนิดมิไส้ ซึ่งก็ยังมีใช้กันอยู่ หลังจากนั้นได้มีการนำไฟฟ้ามาใช้งาน ด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น ให้แสงสว่าง ให้ความร้อน ใช้ในงานด้านมอเตอร์ วิทยุ โทรทัศน์ ฯลฯ เป็นต้น โดยสรุปชีวิตประจำวันของมนุษย์จะต้องมีความเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเสมอ

### 1.1.1 การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

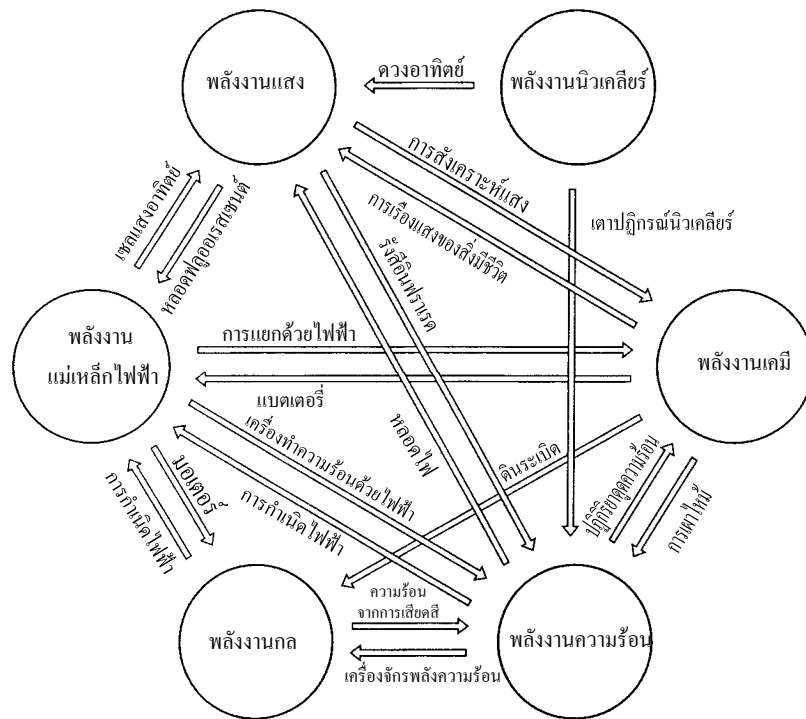
เรามาลองคิดกันดูว่าถ้าไม่มีไฟฟ้าแล้วจะเกิดอะไรขึ้น หลอดไฟจะจุดไม่ติด วิทยุโทรทัศน์ จะใช้การไม่ได้ รถยนต์ก็วิ่งไม่ได้ น้ำประปาก็ไม่ไหล จะหุงข้าวหรือปิ้งขนมปังก็ไม่ได้ ดังนั้น ถ้าจะกล่าวถึงชีวิตประจำวันของเราทุกวันนี้ต้องอาศัยไฟฟ้า ก็คงไม่เกินความจริงนัก เพราะของใช้ที่อยู่รอบๆ ตัวเราเป็น เครื่องไฟฟ้าเกือบทั้งสิ้นตั้งแต่ เตารีด ตู้เย็น เครื่องปิ้งขนมปัง โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องใช้ในบ้าน เช่น เตาแก๊ส หุงต้มที่จุดด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีโทรศัพท์ โทรเลข และเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ อีกมากมายในอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้านั้นมีแหล่งกำเนิดขึ้นได้ 7 วิธีด้วยกัน และบางวิธีก็สามารถนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งแหล่งกำเนิดดังกล่าวมีดังนี้

1. การเสียดสี (Friction) วิธีการนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยการนำวัตถุสองชนิดมาถูกัน
2. แรงกดดัน (Pressure) วิธีการนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยการบีบตัวของผลึกคริสตารอน (Crystal)
3. ความร้อน (Heat) วิธีนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนที่จุดต่อของโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิด
4. แสงสว่าง (Light) วิธีการนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยเมื่อมีแสงสว่างส่องกระทบกับสารที่มีความไวต่อแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์
5. ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Action) วิธีการนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction) เช่น ในแบตเตอรี่
6. อำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) วิธีการนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยเอาตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก หรือเอาสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำไฟฟ้าในลักษณะเช่นนี้ ตัวนำไฟฟ้า ก็จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กเหมือนกัน จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น
7. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นพลังงานที่ได้นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างการศึกษาของประเทศไทย แต่อีกหลายประเทศมีโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นี้ใช้แล้ว พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานที่ให้ประโยชน์อย่างมหาศาล แต่ก็เป็นภัยอย่างใหญ่หลวง ถ้าเทคโนโลยีไม่เพียงพอ และจริยธรรมคุณธรรมของผู้ดูแลตั้งแต่กระบวนการก่อสร้างไม่ดี

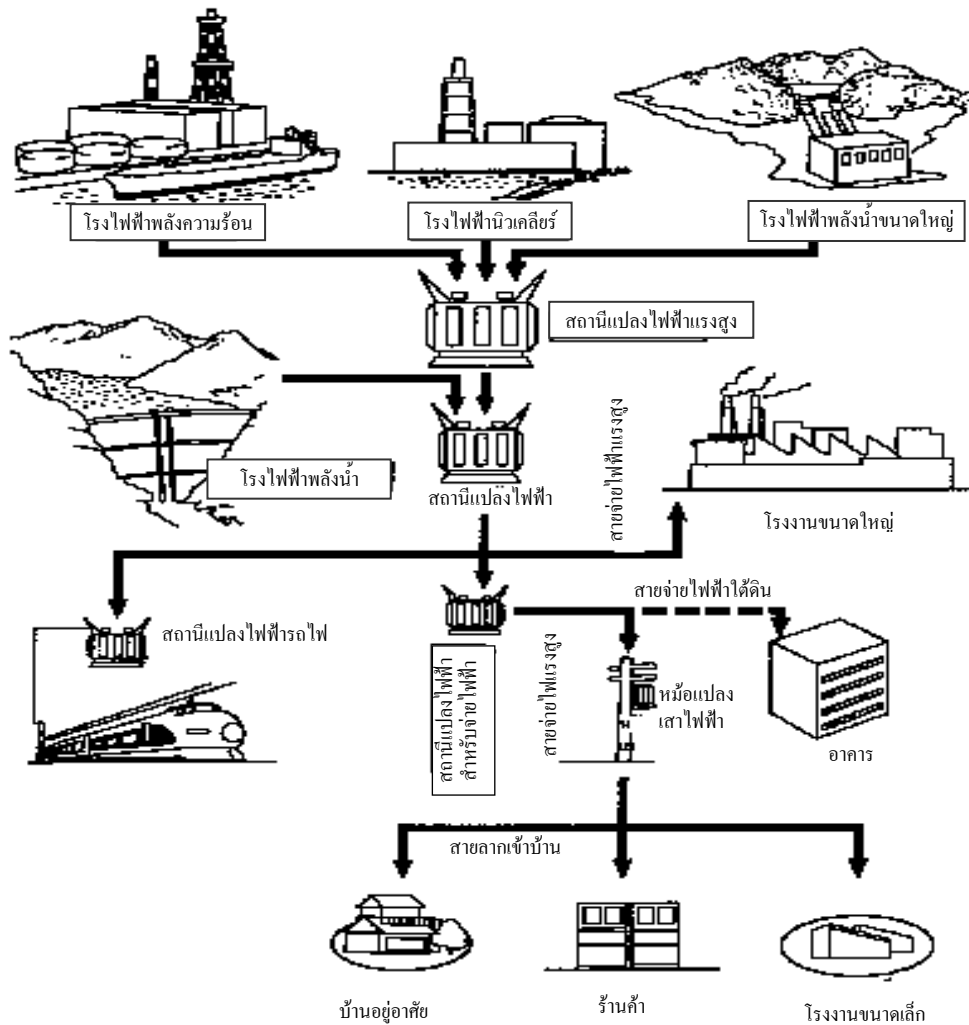
พลังงานแต่ละรูปที่กล่าวมา (เมื่อรวมพลังงานจากการเสียดสี (Friction)) และแรงกดดัน (Pressure) เป็นพลังงานกล จะมีการแปลงรูปของพลังงานไปมาระหว่างกันตามรูปที่ 1.1 ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งเป็นโรงงานผลิตไฟฟ้า ที่มีการแปลงพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานความร้อนด้วยการเผาไหม้ แปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลด้วยเครื่องจักรพลังความร้อน (Heat engine) ที่เรียกว่าเทอร์ไบน์ และแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อนึ่ง ในการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานต่างรูปกัน จะต้องมีการสูญเสียพลังงานเสมอ ความสูญเสียนี้เกือบทั้งหมดจะกลายเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานที่แปลงมาแล้วแต่ละรูป สุดท้ายก็ จะกลายเป็นพลังงานความร้อนเช่นกัน ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากลวิธื่อนุรักษ์พลังงานประการหนึ่ง ก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน เพื่อลดการปล่อยพลังงานที่มีคุณภาพต่ำ



รูปที่ 1.1 การแปลงพลังงานระหว่างรูปต่างๆ

โรงไฟฟ้าจะมีหลายประเภท เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนใต้ดิน โรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังลม เป็นต้น รูปที่ 1.2 แสดงระบบจ่ายไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า (โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ) ของผู้ผลิตไฟฟ้าทั่วไป ผ่านสายส่งไฟฟ้า สถานีแปลงไฟฟ้า ไปจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า กว่าไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจะเดินทางจากโรงไฟฟ้าไปถึงโรงงานและอาคารต่างๆ ไม่เพียงแต่จะเกิดความสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่พลังงานที่ต้องใช้ในสถานีแปลงไฟฟ้าก็เสมือนหนึ่งเกิดความสูญเสียขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1.2 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า

### 1.1.2 วิธีใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตัวเอง

ในระยะหลัง สถานประกอบการที่มีระบบกำเนิดไฟฟ้าของตัวเอง เช่น มีระบบโคเจนเนอเรชันและระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ในโรงงานและอาคารได้เพิ่มจำนวนมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าจากระบบเหล่านี้ จะช่วยจ่ายให้พลังงานไฟฟ้า ให้กับเครื่องไฟฟ้าต่างๆ นอกเหนือพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากผู้ผลิตไฟฟ้าทั่วไป

นอกจากนี้ ในระยะหลังยังมีการให้บริษัทผู้ประกอบการเอกชนเข้ามาติดตั้งระบบกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานหรืออาคาร เพื่อจำหน่ายไฟฟ้าที่กำเนิดได้และความร้อนทิ้งจากระบบกำเนิดไฟฟ้าสามารถที่นำกลับมาใช้ให้กับ โรงงานหรืออาคารอีกด้วย ผู้ประกอบการแบบนี้เรียกว่า On-site electric power company

ระบบกำเนิดไฟฟ้าของตัวเองในลักษณะนี้ จะติดตั้งอยู่ในที่ดินของโรงงานหรืออาคาร ซึ่งมีข้อดีที่ไม่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจากความเสี่ยงในสายส่งและความสิ้นเปลืองในสถานีแปลงไฟ เหมือนกับไฟฟ้าทั่วไป

### 1.1.2.1 ระบบโคเจนเนอเรชัน

ระบบโคเจนเนอเรชันเป็นระบบการใช้พลังงานแบบ Cascade โดยนำพลังงานคุณภาพสูงที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องคอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำความเย็น แล้วนำความร้อนทิ้งที่ได้จากเครื่องต้นกำลังไปใช้ในการปรับอากาศร้อน-เย็น ซึ่งต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า ด้วยวิธีการใช้พลังงานในลักษณะนี้ จะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าสูงขึ้น ในปัจจุบันมักจะเรียก ระบบที่กำเนิดไฟฟ้าและนำความร้อนทิ้งมาใช้ร่วมกันว่า ระบบโคเจนเนอเรชัน รูปที่ 1.3 แสดงรูประบบโคเจนเนอเรชันในโรงแรม ไฟฟ้าที่กำเนิดได้จากเครื่องยนต์แก๊สและเซลล์เชื้อเพลิง จะนำไปเชื่อมต่อกับไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับภาระ ส่วนความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้จะนำไปใช้ปรับอากาศร้อน-เย็น และจ่ายน้ำร้อน

ระบบโคเจนเนอเรชันที่นำมาใช้ในอาคารภาคบริการ เช่น โรงแรม นี้จะมีความแตกต่างจากโรงงาน เนื่องจากภาระกำลังไฟฟ้าและภาระความร้อนจะขึ้นอยู่กัช่วงเวลาและฤดูกาล ดังนั้นจึงควรมีการบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลการเดินเครื่องหลังจากเริ่มเดินเครื่องแล้วประมาณ 1 ปี เพื่อตรวจสอบว่ามีการเดินเครื่องด้วยสมรรถนะสูง

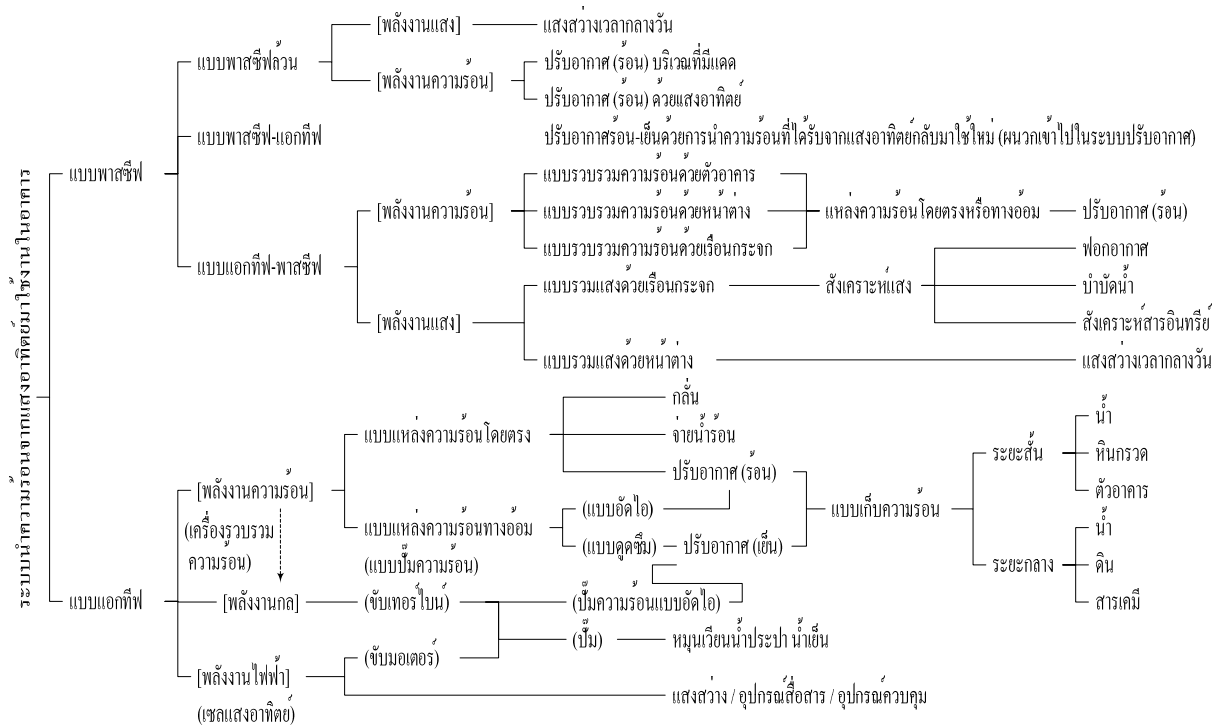
การทำเช่นนี้ได้ จะต้องบันทึกปริมาณไฟฟ้าที่กำเนิดได้ ปริมาณความร้อนทิ้งที่นำมาใช้ ประโยชน์ และความสัมพันธ์เชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้า อัตราการใช้ประโยชน์ จากความร้อนทิ้ง (อัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนทิ้งที่นำมาใช้ประโยชน์ต่อปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่เครื่องต้นกำลัง) ประสิทธิภาพรวม (ประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้า+อัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง)

กรณีที่มีประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ แสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องด้วยภาระไม่เต็มพิกัดเป็นส่วนใหญ่ กรณีที่อัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งมีค่าต่ำ ให้พิจารณาทบทวนวิธีการนำความร้อนทิ้งไปใช้ประโยชน์ หรือตรวจสอบระบบควบคุมอุปกรณ์แหล่งความร้อนช่วย

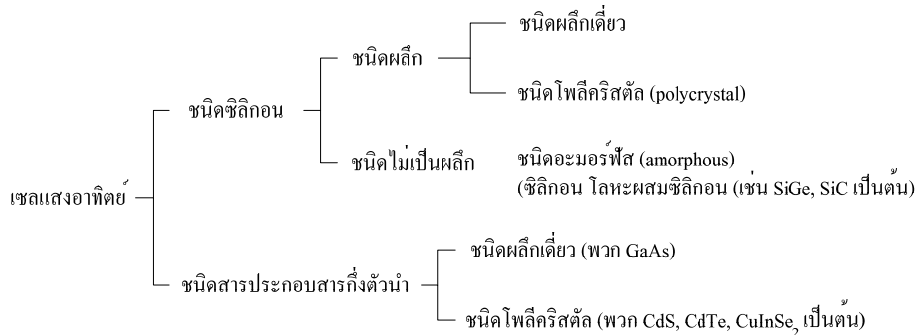
ในการทำให้มีประสิทธิภาพการอนุรักษ์พลังงานสูง (อัตราการอนุรักษ์พลังงาน มากกว่า 10 [%]) ในกรณีของเครื่องยนต์แก๊สจะต้องมีประสิทธิภาพรวมไม่น้อยกว่า 67 [%] กรณีของก๊าซเทอร์ไบน์ไม่น้อยกว่า 72 [%] และกรณีของเครื่องยนต์ดีเซลไม่น้อยกว่า 50 [%] นอกจากนี้ ควรมีการจัดการการเดินเครื่องให้มีระยะเวลาเดินเครื่องเทียบเท่าภาระรวมตลอดปีไม่น้อยกว่า 4,000 ชั่วโมง



**ตอนที่ 2 บทที่ 1** ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

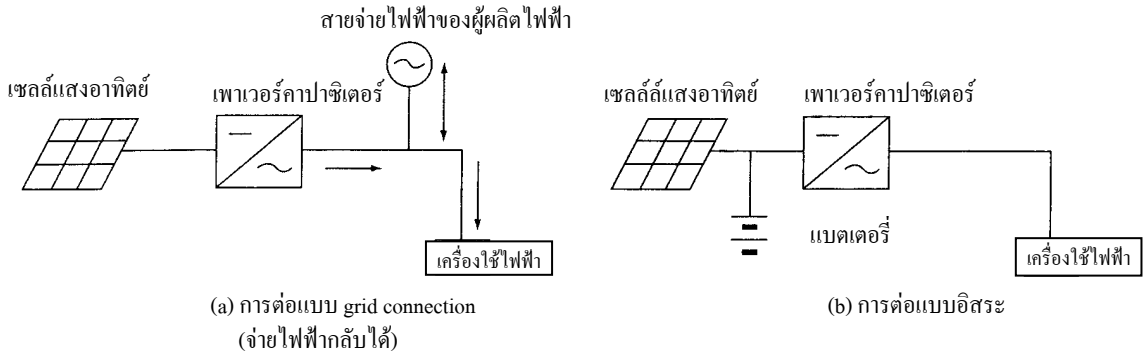


**รูปที่ 1.4** ประเภทของระบบการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน



**รูปที่ 1.5** ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์มีหลายแบบดังรูปที่ 1.6 โดยมีการมีหรือไม่มีแบตเตอรี่ และการต่อวงจรเชื่อมกับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเป็นเกณฑ์ ในโรงงานและอาคารต่างๆ มักจะต่อแบบ Grid connection การต่อวงจรแบบ Grid connection นั้นเมื่อพลังงานไฟฟ้าที่กำเนิดได้มีมากเกินไป จะสามารถจ่ายไฟฟ้ากลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย



รูปที่ 1.6 ระบบกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์สุริยะ

### 1.1.3 วงจรไฟฟ้า

#### 1.1.3.1 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

##### (1) กฎของโอห์ม

เมื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E$  [V] แก่ความต้านทาน  $R$  [ $\Omega$ ] จะมีกระแสไฟฟ้า  $I$  [A] ไหลเท่ากับ

$$I = \frac{E}{R} \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของโอห์ม

##### (2) กฎของจูล

ความร้อนจูลเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะแปรผันตามผลคูณของความต้านทาน ( $R$ ) กับกำลังสองของกระแสไฟฟ้า ( $I^2$ ) กับเวลา ( $t$ ) และเมื่อแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในเวลา  $t$  วินาที  $RI^2t$  [J] เป็นปริมาณความร้อน  $Q$  [cal] แล้วจะได้

$$Q \approx \frac{1}{4.185} RI^2t \quad \text{cal} \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

เนื่องจาก  $1 \text{ cal} \approx 4.185 \text{ J}$  และ  $1 \text{ cal}$  คือปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ  $1 \text{ g}$  มีอุณหภูมิสูงขึ้น  $1^\circ\text{C}$

##### (3) กฎของ Kirchhoff

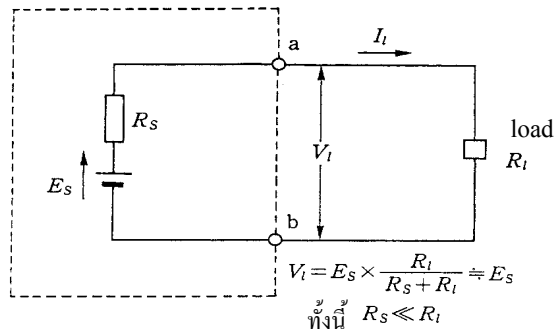
- ความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้า: ผลบวกพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ณ จุดเชื่อมต่อใดๆ ในวงจรจะเท่ากับศูนย์

- ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า: ในวงจรปิดใดๆ ผลบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับทั้งหมดตามทิศทางเดินรอบวงจรเดียวกันจะเท่ากับศูนย์

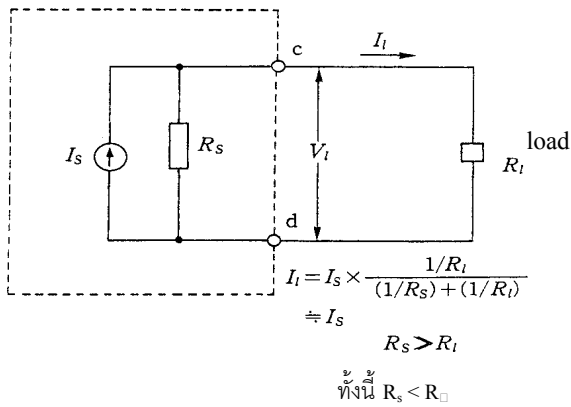
##### (4) Thevenin's Theorem (ทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล) Norton's Theorem (ทฤษฎีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูล)

วงจรความต้านทานที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ จะสมมูลกับ “วงจรอนุกรมที่ประกอบด้วยตัวต้านทานกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่” หรือ “วงจรขนานที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่” ทฤษฎีแรกเรียกว่า Thevenin's Theorem ทฤษฎีหลังเรียกว่า Norton's Theorem โดย Thevenin's Theorem มีอีกชื่อหนึ่งว่า ทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล และ Norton's Theorem มีอีกชื่อหนึ่งว่า ทฤษฎีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูล นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้า  $E_s$  ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า หมายถึงแรงดันไฟฟ้าขณะชั้ว  $ab$  เปิดอยู่ อิมพีแดนซ์อนุกรม  $R_s$

เป็นค่าความต้านทานวัดที่ขั้วเมื่อลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟและตัดแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจร แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า  $I_s$  ให้ถือว่ากระแสไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ  $E_s/R_s$  โดยค่า  $R_s$  เป็นค่าความต้านทานวัดที่ขั้วเมื่อเปิดวงจร



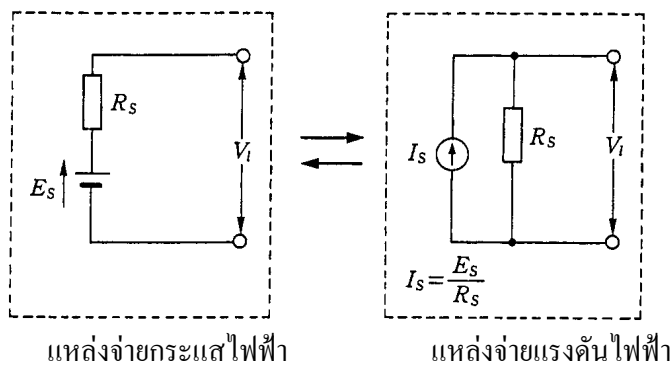
(ก) วงจร โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล



(ข) วงจร โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูล

รูปที่ 1.7 วงจรไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล

จากรูปที่ 1.7 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูลและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูลสามารถแปลงไปมาระหว่างกันได้ (ดูรูปที่ 1.8)

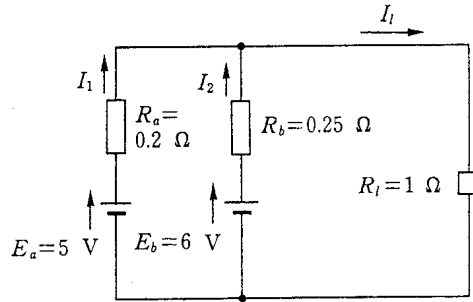


แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้  $I_s = \frac{E_s}{R_s}$

รูปที่ 1.8 การแปลงสมมูลระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

ตัวอย่าง 1.1 มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (แบตเตอรี่) 2 ก้อน มี  $E_a = 5V$ ,  $E_b = 6V$  มีความต้านทานภายใน  $R_a = 0.2\Omega$ ,  $R_b = 0.25\Omega$  ต่อขนานกันอยู่ดังรูปที่ 1.9 แล้วนำภาระความต้านทาน  $R_l = 1\Omega$  มาต่อเป็นวงจรกระแสตรง

จงแปลงวงจรนี้เป็นวงจรสมมูลที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า 2 ตัว และคำนวณหากระแสไฟฟ้า  $I_1$ ,  $I_2$  ที่ไหลผ่านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $E_a$ ,  $E_b$  และหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $I_l$



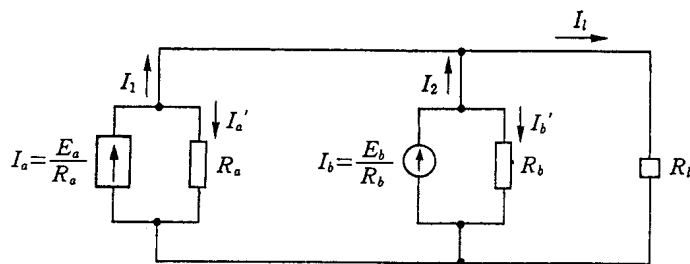
รูปที่ 1.9 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

วิธีทำ: ก่อนอื่นให้ใช้วิธีตามรูปที่ 1.8 แปลงวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 1.9 ให้เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ก่อนจะได้เป็นรูปที่ 1.10 (ก) เมื่อเขียนวงจรนี้ให้เข้าใจง่ายแล้วจะกลายเป็นรูปที่ 1.10 (ข)

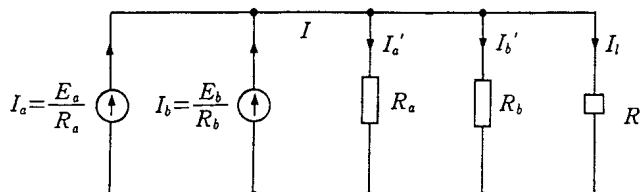
$$I = I_a + I_b = \frac{E_a}{R_a} + \frac{E_b}{R_b}$$

$$= \frac{5}{0.2} + \frac{6}{0.25} = 49 \text{ A}$$

กระแสไฟฟ้าในแต่ละเส้นทางในวงจรขนานในรูปที่ 1.10 (ข) จะมีสัดส่วนแปรผันตามการนำไฟฟ้า (ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้า) ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า  $I_l$  จึงมีค่าดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

$$I_t = I \times \frac{1/R_t}{(1/R_a) + (1/R_b) + (1/R_t)}$$

$$= 49 \times \frac{1}{5+4+1} = 4.9 \text{ A}$$

ในการทำงานเดียวกัน จะคำนวณ  $I'_a, I'_b$  ได้ดังต่อไปนี้

$$I'_a = I \times \frac{1/R_a}{(1/R_a) + (1/R_b) + (1/R_t)}$$

$$= 49 \times \frac{5}{5+4+1} = 24.5 \text{ A}$$

$$I'_b = I \times \frac{1/R_b}{(1/R_a) + (1/R_b) + (1/R_t)}$$

$$= 49 \times \frac{4}{5+4+1} = 19.6 \text{ A}$$

เมื่อกลับมาพิจารณารูปที่ 1.10 (ก) เพื่อคำนวณกระแส  $I_1, I_2$  จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (แบตเตอรี่) แต่ละตัวจะได้ดังต่อไปนี้

$$I_1 = I_a - I'_a = 25 - 24.5 = 0.5 \text{ A}$$

$$I_2 = I_b - I'_b = 24 - 19.6 = 4.4 \text{ A}$$

จะเห็นว่า เมื่อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว ก็สามารถคำนวณวงจรขนานได้สะดวกโดยไม่ต้องใช้กฎของ Kirchhoff

### 1.1.3.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

(1) กระแสสลับรูปคลื่นไซน์

ส่วนประกอบต่างๆ ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังต่อไปนี้

แรงดันไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ

$$e(t) = E_m \sin(\omega t \pm \theta)$$

amplitude [V]      เวลา [s]

leading

lagging

ความถี่เชิงมุม [rad/s]

เฟส [rad]

$$\omega = 2\pi f \quad \rightarrow \quad \frac{1}{f} = T$$

ความถี่ [Hz]      คาบ [s]

ค่าเฉลี่ย : กระแสสลับรูปคลื่นไซน์เป็นคลื่นที่มีลักษณะเป็นคาบ จึงคำนวณค่าเฉลี่ยได้จากค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบ ซึ่งค่าเฉลี่ยต่างๆ ที่สำคัญของคลื่นไซน์มีดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยของ } E_m \sin \varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_m \sin \varphi \, d\varphi = 0$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของ } |E_m \sin \varphi| = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \varphi \, d\varphi = \frac{2}{\pi} E_m \approx 0.6366 E_m$$

$$\text{รากที่สองของค่าเฉลี่ยของกำลังสอง (Effective value)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m^2 \sin^2 \varphi \, d\varphi} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.7071 E_m$$

(2) อิมพีแดนซ์

กรณีที่กำลังวิเคราะห์แอสลับรูปคลื่นไซน์เรามีปริมาณชื่อ อิมพีแดนซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับความต้านทานในวงจรกระแสตรง

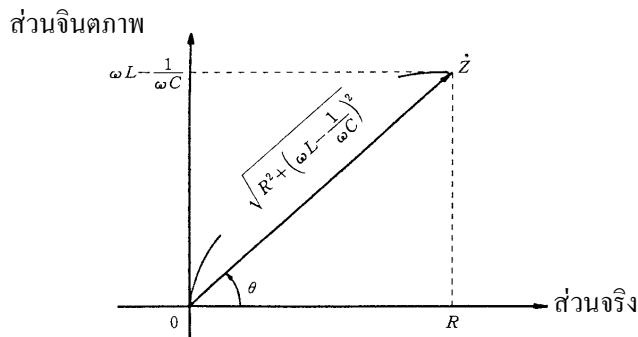
- อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม RLC

$$\dot{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \text{ : อิมพีแดนซ์จำนวนเชิงซ้อน} \dots\dots\dots (1.3)$$

เมื่อแปลงเป็น Polar coordinate จะได้ว่า

$$\dot{Z} = \left\{ \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \right\} e^{j\theta}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \dots\dots\dots (1.4)$$

ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์จำนวนเชิงซ้อน  $\dot{Z}$  แสดงด้วย  $|\dot{Z}|$  เรียกค่าว่า อิมพีแดนซ์ เมื่อนำค่า  $\dot{Z}$  ไปวัดลงบนระนาบเชิงซ้อนจะได้ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11

(3) Symbolic method

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta_e) \rightarrow \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_e} = E e^{j\theta_e} = \dot{E} \dots\dots\dots (1.5)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta_i) \rightarrow \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_i} = I e^{j\theta_i} = \dot{i} \dots\dots\dots (1.6)$$

ค่า Effective

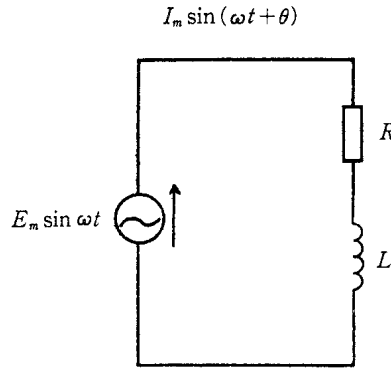
Symbolic method เป็นวิธีการคำนวณโดยให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนเข้าไป แล้วคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรโดยใช้อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่กล่าวไปแล้วข้างต้น คำนวณหาความสัมพันธ์ของ Amplitude ออกมา

หลักการของ Symbolic method ก็คือการบวก ลบ หาคอนุพันธ์ และอินทิเกรตคลื่นไซน์ จะได้คลื่นไซน์ ที่มีความถี่เชิงมุมเท่ากันแต่ Amplitude และเฟสจะต่างกัน

(4) วิธีแก้โจทย์วงจร

ต่อไปนี้จะลองใช้  $\dot{E}$ ,  $\dot{i}$  และ  $\dot{Z}$  ในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรแอสลับ

ตัวอย่าง 1.2 รูปที่ 1.12 แสดงวงจรอนุกรม RL เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $E_m \sin \omega t$  ให้แก่วงจรนี้ จะมีกระแสไหลเท่าใด



รูปที่ 1.12

- วิธีทำ:
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า:  $E_m \sin \omega t \rightarrow \dot{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m$
  - อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน:  $Z = R + j\omega L$
  - กระแสไฟฟ้า: สมมติให้เท่ากับ  $I_m \sin(\omega t + \theta) \rightarrow \dot{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m e^{j\theta}$

นั่นคือ

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{Z} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} E_m}{R + j\omega L} = \frac{E_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} e^{-j\phi} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta}$$

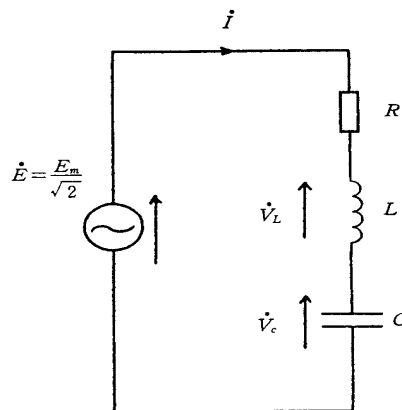
ในที่นี้

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad \therefore I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \theta = -\tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

กล่าวคือ

$$i(t) = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}\right)$$

ตัวอย่าง 1.3 เมื่อให้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ แก่วงจรอนุกรม RLC ตามรูปที่ 1.13 และจงหาความถี่เชิงมุม  $\omega = \omega_0$  ที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลสูงที่สุด และจงหาแรงดัน  $|\dot{V}_L|$  และ  $|\dot{V}_C|$  ที่ตกคร่อม L และ C ด้วย



รูปที่ 1.22

วิธีทำ: ถ้าให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเป็น  $i$  ขนาดของกระแสไฟฟ้า  $|i|$  จะเท่ากับ

$$|i| = \left| \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} E_m}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \right| = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า  $|i|$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega$  เท่ากับ  $\omega_0$  ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\text{จาก } \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad \text{จะได้ } \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (\text{ความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม})$$

$$\left( f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right)$$

ในกรณีนี้  $|i|_{max} = E_m / (\sqrt{2}R)$

ดังนั้น

$$|\dot{V}_L| = |i|_{max} \cdot \omega_0 L = \frac{\omega_0 L E_m}{R \sqrt{2}} = Q_s \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

$$|\dot{V}_C| = |i|_{max} \cdot \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\omega_0 RC} \frac{E_m}{\sqrt{2}} = Q_s \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

จากความสัมพันธ์  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

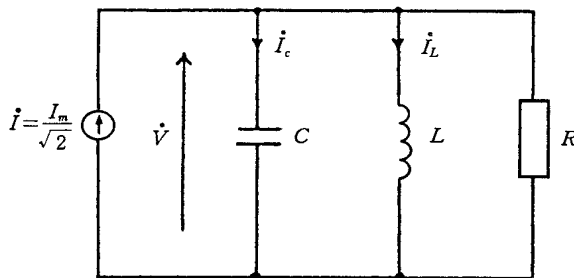
$$\frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{LC}}{RC} = \frac{1}{\omega_0 RC} = Q_s$$

ค่านี้เรียกว่า ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

กล่าวคือ ทั้ง  $|\dot{V}_L|$  และ  $|\dot{V}_C|$  จะมีค่าเป็น  $Q_s$  เท่าของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ

ตัวอย่าง 1.20 เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า  $I_m \sin \omega t$  ให้แก่วงจรเรโซแนนซ์ขนาน RLC ตามรูป 1.23

จงหา  $\omega = \omega_0$  ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้ว  $|\dot{V}|$  มีค่าสูงสุดที่สุด และจงหากระแสไฟฟ้า  $|i_L|$  และ  $|i_C|$  ที่ไหลผ่าน L และ C ด้วย



รูปที่ 1.14

วิธีทำ: จะเห็นได้ชัดเจนว่า

$$|\dot{V}| = \left| \frac{1}{1/R + 1/j\omega L + j\omega C} \right| \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

ดังนั้น  $\omega = \omega_0$  ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้ว  $|\dot{V}|$  มีค่าสูงสุดที่สุดคือ

$$\text{เมื่อ } \omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} = 0 \quad \text{จะได้ } \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

ในกรณีนี้

$$|\dot{V}|_{\max} = R \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

ดังนั้น

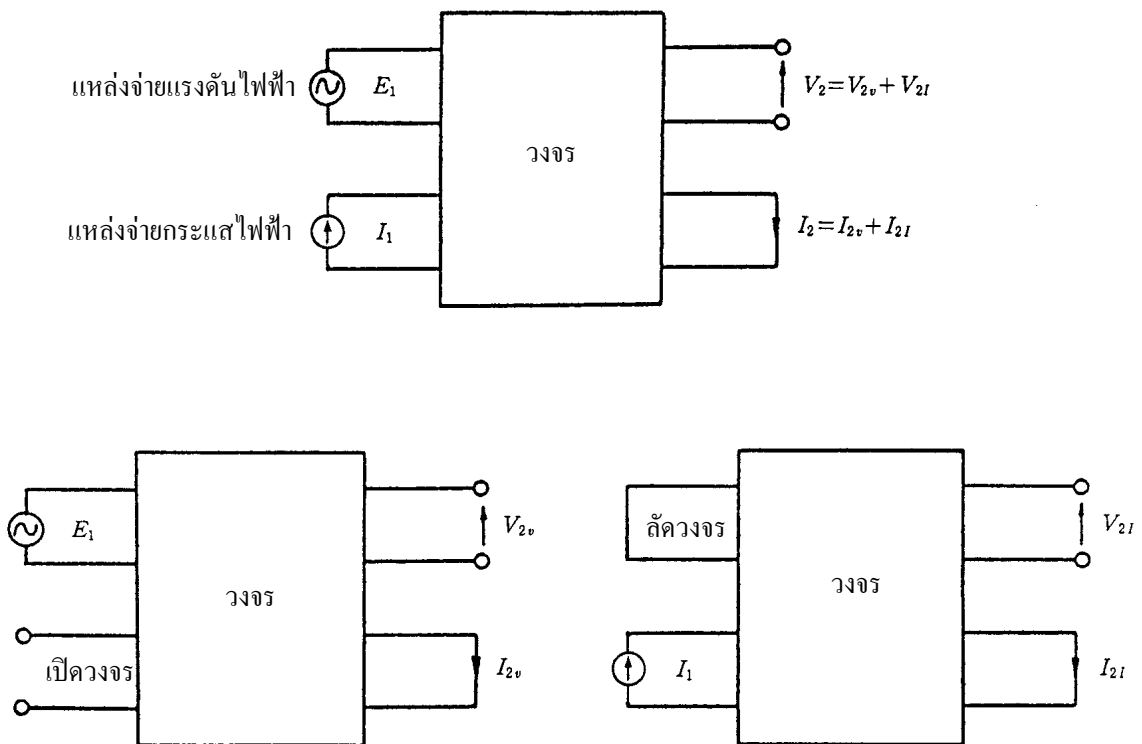
$$|i_L| = \frac{1}{\omega_0 L} |\dot{V}|_{\max} = \frac{R}{\omega_0 L} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = Q_p \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$|i_C| = \omega_0 C |\dot{V}|_{\max} = \omega_0 RC \frac{I_m}{\sqrt{2}} = Q_p \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

ในที่นี้  $Q_p$  เรียกว่า ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ขนาน

(5) Principle of superposition

รูปที่ 1.15 จะอธิบาย Principle of superposition กล่าวคือ หลักการนี้อธิบายว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและแหล่งกระแสไฟฟ้า จะเท่ากับผลบวกของ แรงดันไฟฟ้า  $V_{2v}$  และกระแสไฟฟ้า  $I_{2v}$  ที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $E_1$  เมื่อเปิดวงจรและถอดแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าออกจากวงจร กับ แรงดันไฟฟ้า  $V_{2i}$  และกระแสไฟฟ้า  $I_{2i}$  ที่เกิดจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า  $I_1$  เมื่อลัดวงจรและถอดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจร กรณีที่มีทั้งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าหลายตัวอยู่ในวงจร เราสามารถหาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟแต่ละตัวแล้วค่อยนำมาบวกกันได้ตามวิธีข้างต้น



รูปที่ 1.15

ตัวอย่าง 1.15 จงคำนวณหาแรงดันตกคร่อม  $V$  ของวงจรในรูป 1.16

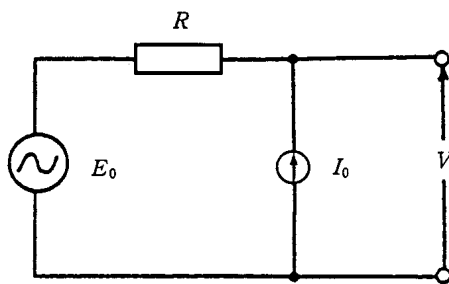
- วิธีทำ:
- แรงดันตกคร่อมที่ขั้วเมื่อเปิดวงจรและถอดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าออก:  $E_0$
  - แรงดันตกคร่อมที่ขั้วเมื่อลัดวงจรและถอดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออก:  $RI_0$
- $\therefore V = E_0 + RI_0$

(6) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

สมมติให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกระแสสลับเท่ากับ

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta_e) \rightarrow \dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_e} \quad \dots\dots\dots(1.7)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta_i) \rightarrow \dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_i} \quad \dots\dots\dots(1.8)$$



รูปที่ 1.16

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย  $P$  ต่อหนึ่งคาบจะคำนวณได้จาก

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} e(t)i(t)dt = \frac{E_m I_m}{2} \cos(\theta_i - \theta_e) \quad \dots\dots\dots(1.9)$$

ส่วนกำลังไฟฟ้าจำนวนเชิงซ้อน  $\dot{P}$  มีสูตรนิยามดังต่อไปนี้

$$\dot{P} = i\dot{V}^* = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_i} \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{-j\theta_e} = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{E_m}{\sqrt{2}}\right) e^{j(\theta_i - \theta_e)} \quad \dots\dots\dots(1.10)$$

กล่าวคือ

$$\dot{P} = \frac{E_m I_m}{2} \cos(\theta_i - \theta_e) + j \frac{E_m I_m}{2} \sin(\theta_i - \theta_e) = P + jQ \quad \dots\dots\dots(1.11)$$

ขนาดของ  $\dot{P}$  เรียกว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ [VA] ส่วนจริงของ  $\dot{P}$  เรียกว่ากำลังไฟฟ้าจริง  $P$  [W] ส่วนจินตภาพของ  $\dot{P}$  เรียกว่า กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  $Q$  [VAr]

ตัวอย่าง 1.6 จากวงจรอนุกรม RL ในรูป 1.17 เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า  $\dot{V}$  แก่วงจรนี้ จงคำนวณหา กำลังไฟฟ้าจริง  $P$  กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  $Q$  และเพาเวอร์แฟกเตอร์  $\cos \phi$

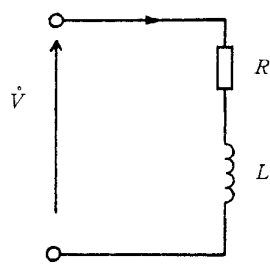
วิธีทำ: จาก  $\dot{Z} = R + j\omega L$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}}{R + j\omega L}$$

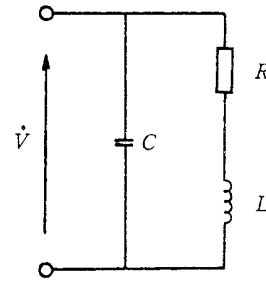
ดังนั้น

$$\dot{P} = \dot{I}\dot{V}^* = \frac{\dot{V}}{R + j\omega L} \cdot \dot{V}^* = \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} |\dot{V}|^2$$

$$\therefore P = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} |\dot{V}|^2 \text{ [W]}, \quad Q = \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} |\dot{V}|^2 \text{ [Var]}$$



รูปที่ 1.17



รูปที่ 1.18

จาก  $-\tan \phi = \frac{\omega L}{R}$  จะได้ว่า  $\cos \phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$

ในที่นี้จะลองพิจารณาเมื่อนำคาปาซิเตอร์ที่ความจุไฟฟ้าสถิต C มาต่อขนานกับวงจรตามรูปที่ 1.18 กำลังไฟฟ้าปรากฏ P ที่ป้อนให้แก่ C สามารถคำนวณได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V ดังนี้

$$P_c = j\omega C V \dot{V}^* = j\omega C |\dot{V}|^2 = jQ_c$$

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏประกอบด้วยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่านั้น หากเลือกใช้ C ที่ทำให้  $Q_c + Q = 0$  กล่าวคือ

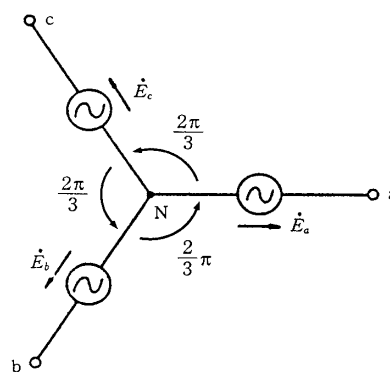
$$C = L / (R^2 + \omega^2 L^2)$$

กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของทั้งวงจรจะเท่ากับศูนย์ เหลือแต่กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น กล่าวคือเพาเวอร์แฟกเตอร์จะเท่ากับ 1 ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า เราสามารถปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหนี่ยวนำได้ด้วยการต่อคาปาซิเตอร์

### 1.1.4 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

วิธีการต่อวงจรกระแสสลับที่ประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลายชุด โดยแต่ละตัวมีความถี่เชิงมุมเท่ากัน แต่มีเฟสไม่พร้อมกัน เรียกว่า กระแสสลับหลายเฟส วิธีที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 ชุด เรียกว่า ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่มี Amplitude เท่ากัน และมีเฟสแตกต่างกัน  $2\pi/3 \text{ rad} = 120^\circ$  เรียกว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร ในรูปที่ 1.19 กรณีที่  $e_a, e_b$  และ  $e_c$  เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟสจะเท่ากับ



รูปที่ 1.19

$$e_a = \sqrt{2}E_m \sin(\omega t) \rightarrow \dot{E}_a = \dot{E} \quad \text{ถือเป็นเวกเตอร์ฐาน} \dots\dots\dots (1.12)$$

$$e_b = \sqrt{2}E_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \rightarrow \dot{E}_b = \dot{E} e^{j\frac{4\pi}{3}} \dots\dots\dots (1.13)$$

$$e_c = \sqrt{2}E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \rightarrow \dot{E}_c = \dot{E} e^{j\frac{2\pi}{3}} \dots\dots\dots (1.14)$$

ซึ่งแสดงได้ตามสูตรข้างต้น

ความหมายของโอเปอเรเตอร์  $\alpha$  ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส มีดังต่อไปนี้

เมื่อกำหนดหารากที่สามของ 1 จากสมการ  $x^3 = 1$  จะพบว่า

$$(x - 1)(x^2 + x + 1) = 0$$

$$x - 1 = 0 \quad \text{หรือ} \quad x^2 + x + 1 = 0$$

ดังนั้น  $x = 1$  หรือ  $x = -\frac{1}{2} \pm j\frac{\sqrt{3}}{2}$  และถ้าให้  $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

แล้ว  $-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \alpha^2$

ดังนั้น คำตอบของสมการ  $x^3 = 1$  จึงเท่ากับ  $1, \alpha, \alpha^2$

โอเปอเรเตอร์  $\alpha$  นี้ จึงเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 หน่วยและมีเฟส  $120^\circ (2\pi/3)$  นั่นเอง

เมื่อใช้  $\alpha$  จะแสดงค่าได้ว่า  $\dot{E}_a = \dot{E}, \dot{E}_b = \alpha^2 \dot{E}, \dot{E}_c = \alpha \dot{E}$

(1) แหล่งจ่ายไฟแบบสตาร์

รูปที่ 1.19 แสดงแหล่งจ่ายไฟแบบสตาร์ โดยนำด้านปลายสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าแต่ละเฟสมาต่อรวมกันที่จุด N (จุดนิวทรัล)  $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$  เรียกว่าแรงดันเฟส (Phase voltage) กรณีที่แรงดันเฟสเหล่านี้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร จะได้ว่า

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = (1 + \alpha + \alpha^2)\dot{E} = 0 \dots\dots\dots (1.15)$$

(2) แหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้า

แหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้า จะนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าแต่ละเฟสมาต่อกันเป็นวง  $\dot{E}_{ab}, \dot{E}_{bc}, \dot{E}_{ca}$  เรียกว่า แรงดันสาย (Line voltage) กรณีที่แรงดันสายเหล่านี้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร จะได้ว่า

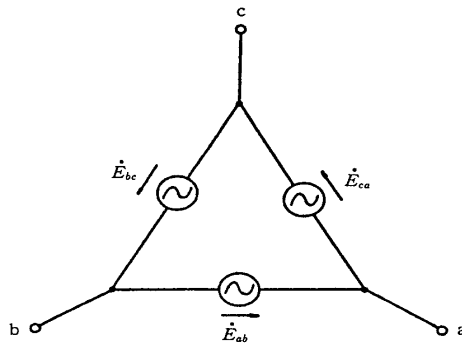
$$\dot{E}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b = (1 - \alpha^2)\dot{E}_a = \sqrt{3} e^{j\frac{\pi}{6}} \dot{E}_a \dots\dots\dots (1.16)$$

$$\dot{E}_{bc} = \alpha^2 \dot{E}_{ab}, \quad \dot{E}_{ca} = \alpha \dot{E}_{ab} \dots\dots\dots (1.17)$$

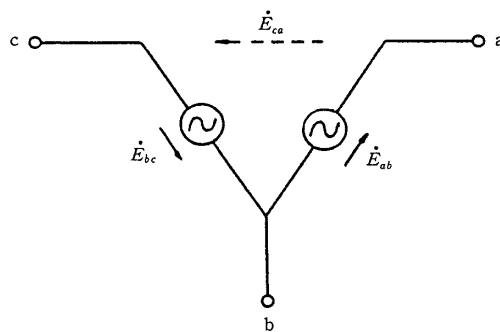
กล่าวคือ แรงดันสายจะมีค่าเป็น  $\sqrt{3}$  เท่าของแรงดันเฟส และมีเฟสนำอยู่  $\pi/6$  rad จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เราสามารถ แปลงวงจรไปมาระหว่างสตาร์กับเดลต้าได้ (รูปที่ 1.20)

(3) แหล่งจ่ายไฟแบบตัว V

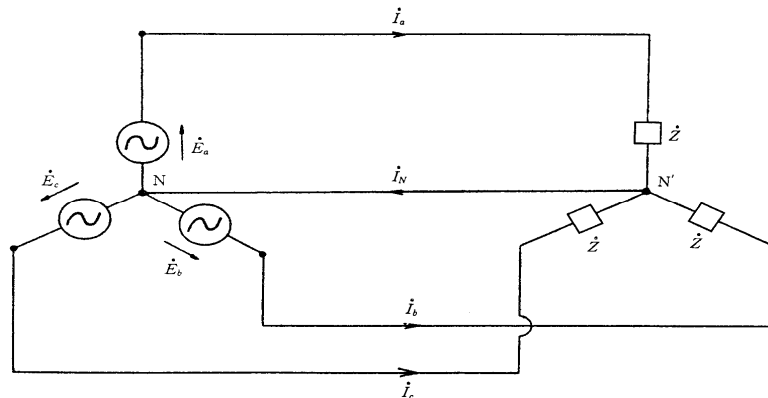
แหล่งจ่ายไฟแบบตัว V คือการแหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้าโดยที่มีแหล่งจ่ายไฟหายไป 1 ตัว แต่เราก็สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสจากการต่อแบบตัว V ได้ (รูปที่ 1.21)



รูปที่ 1.21



รูปที่ 1.22



รูปที่ 1.31

(4) ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

ภาระไฟฟ้า 3 เฟสที่อิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ เรียกว่า ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล หรือ ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร กรณีที่มีป้อนแรงดันกระแสสลับ 3 เฟสสมมาตรต่อแบบสตาร์ ให้กับภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล โดยที่แต่ละเฟสมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z$  กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะเท่ากับ

$$i_a = \frac{\dot{E}_a}{Z} \quad i_b = \frac{\dot{E}_b}{Z} = \alpha^2 i_a \quad i_c = \frac{\dot{E}_c}{Z} = \alpha i_a \quad \dots\dots\dots (1.18)$$

ดังนั้น

$$\therefore \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_N = (1 + \alpha + \alpha^2)\dot{I}_a = 0 \quad \dots\dots\dots(1.19)$$

จากข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) กรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีลักษณะสมมาตร และภาระไฟฟ้าเป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายนิวทรัล

(2) กรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีลักษณะสมมาตร และภาระไฟฟ้าเป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแต่ละสายและแต่ละเฟสจะมีความแตกต่างกันต่างที่เฟสต่างกัน  $2\pi/3$  เท่านั้น ในกรณีนี้เราสามารถพิจารณาวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสว่าเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวได้

(5) การแปลงภาระไฟฟ้าระหว่างสตาร์-เดลต้า

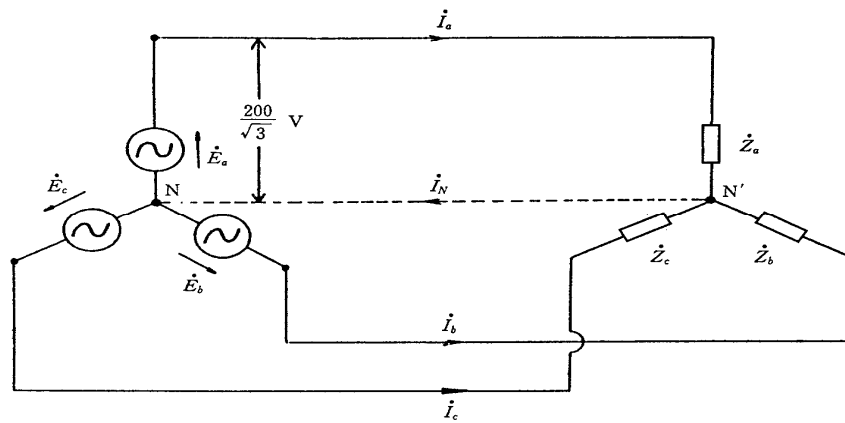
ภาระไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้ากับภาระไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟแบบสตาร์ที่มีอิมพีแดนซ์ตามตารางที่ 1.1 จะสมมูลซึ่งกันและกัน สามารถแปลงแทนกันได้

กรณีที่ เป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมูล เนื่องจาก  $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_3$  และ  $\dot{Z}_a = \dot{Z}_b = \dot{Z}_c$  ดังนั้น

$$\dot{Z}_a = \dot{Z}_1/3 \text{ และ } \dot{Z}_1 = 3\dot{Z}_a$$

ตารางที่ 1.1 การแปลงสมมูลระหว่างวงจรเดลต้ากับวงจรสตาร์

เดลต้า $\longrightarrow$ สตาร์	$\dot{Z}_a = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}$ $\dot{Z}_b = \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}$ $\dot{Z}_c = \frac{\dot{Z}_3 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}$
สตาร์ $\longrightarrow$ เดลต้า	$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a}{\dot{Z}_b}$ $\dot{Z}_2 = \frac{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a}{\dot{Z}_c}$ $\dot{Z}_3 = \frac{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a}{\dot{Z}_a}$



รูปที่ 1.23

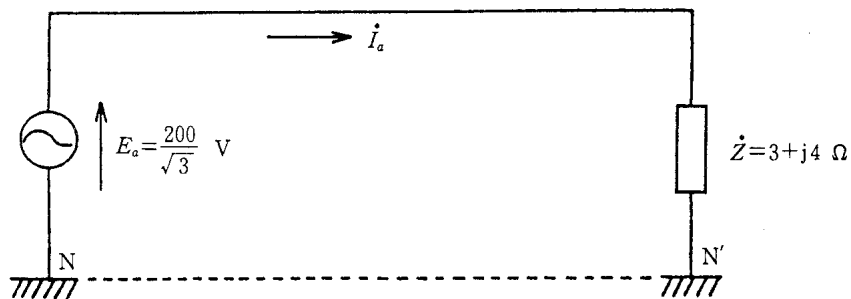
ตัวอย่าง 1.7 ในรูปที่ 1.32 มีแหล่งจ่ายไฟกระสลับ 3 เฟสสมมาตรมีแรงดันสาย 200V และมีภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลที่มี  $Z = 3 + j4$  ต่ออยู่แบบสตาร์ จงคำนวณหากระแสที่ภาระไฟฟ้าและความสูญเสียกำลังไฟฟ้า

วิธีทำ: เนื่องจากการต่อวงจรเป็นแบบสตาร์ ดังนั้นวงจร 1 เฟสจะเป็นดังรูปที่ 1.24

$$E_a = \frac{200}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \text{กระแสสาย } \dot{i}_a &= \frac{\dot{E}}{Z} = \frac{200/\sqrt{3}}{3 + j4} \\ &= \frac{40}{\sqrt{3}} e^{-j \tan^{-1} \frac{4}{3}} \text{ A} \end{aligned}$$

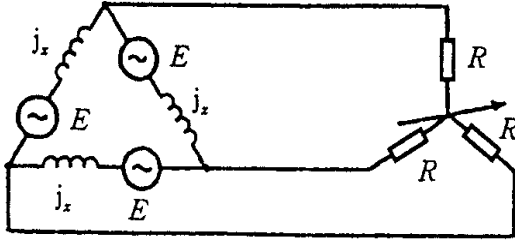
$$\text{ความสูญเสียกำลังไฟฟ้า } P = 3 \times \left( \frac{40}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 3 \times 10^{-3} = 4.8 \text{ kW}$$



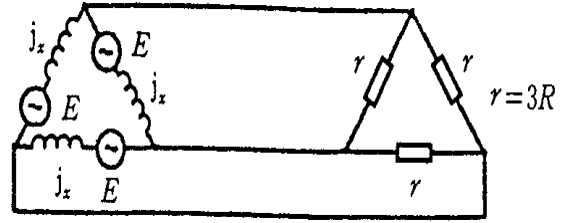
รูปที่ 1.24

ตัวอย่าง 1.8 ในรูปที่ 1.25 มีแหล่งจ่ายไฟกระแสลับ 3 เฟสสมมาตรต่อแบบเดลต้า จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระไฟฟ้าตัวต้านทานเปลี่ยนค่าได้ 3 เฟสต่อแบบสตาร์ จงหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของภาระไฟฟ้า

ทั้งนี้ ให้ถือว่าแรงดันไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์ภายในของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ  $E$  และ  $jx$  โดยไม่ต้องคิดถึงอิมพีแดนซ์อื่นๆ



รูปที่ 1.25



รูปที่ 1.26

วิธีทำ: ถ้าแปลงภาระไฟฟ้าแบบสตาร์ในรูปที่ 1.25 ให้เป็นแบบเดลต้าที่สมมูลกัน จะได้วงจรดังรูปที่ 1.26 โดย  $r = 3R$  ในวงจรหลังนี้ กำลังไฟฟ้าต่อเฟส  $P_1$  ของภาระไฟฟ้าจะเท่ากับ

$$P_1 = rI^2 = r \left( \frac{E}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right)^2 = \frac{r^2 E^2}{r^2 + x^2} = \frac{E^2}{r + \frac{x^2}{r}}$$

ตัวหารประกอบด้วย 2 พจน์ ได้แก่  $r$  และ  $\frac{x^2}{r}$  ถ้าเราใช้ความสัมพันธ์ว่า ค่าเฉลี่ยพีชคณิต  $\geq$  ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต แล้ว

$$\frac{r + \frac{x^2}{r}}{2} \geq \sqrt{r \cdot \frac{x^2}{r}} = x$$

เนื่องจาก  $x$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ผลคูณระหว่าง  $r$  กับ  $\frac{x^2}{r}$  จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อทั้ง 2 พจน์นี้มีค่าเท่ากัน

ดังนั้น

$$r = \frac{x^2}{r}$$

ดังนั้น

$$(r + x)(r - x) = 0$$

และเนื่องจาก  $r > 0$  ดังนั้น  $r = x$  และเนื่องจาก  $r = 3R$  ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ  $R = \frac{x}{3}$  จึงเท่ากับ

$$P = \frac{E^2}{2x} \quad \text{W}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดของภาระไฟฟ้า 3 เฟสจะเท่ากับ

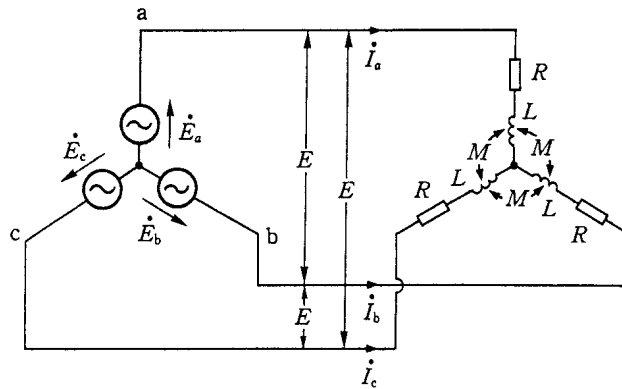
$$P_m = 3P = \frac{3E^2}{2x} \quad \text{W}$$

ตัวอย่าง 1.9 ในรูปที่ 1.27 มีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับสมมาตรที่มีแรงดันสาย  $E$  [V] มีความถี่เชิงมุม  $\omega$  [rad/s] ต่อกับภาระไฟฟ้า 3 เฟสที่มีความต้านทานต่อเฟสกับ  $R$  [ $\Omega$ ] มี Self inductance ต่อเฟสเท่ากับ  $L$  [H] และมี Mutual inductance ระหว่างแต่ละเฟสเท่ากับ  $M$  [H]

ในกรณีนี้จึงคำนวณหาคำตอบของคำถามข้อ (1) และ (2) ต่อไปนี้

ทั้งนี้ กำหนดให้ลำดับของเฟส เป็นไปตาม a-b-c และไม่ต้องคิดถึงอิมพีแดนซ์อื่นๆ นอกเหนือจากที่กำหนดในรูป

- (1) จงคำนวณกระแสที่ภาระไฟฟ้า  $I$
- (2) จงคำนวณเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้า  $\cos \theta$  และความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า  $P$



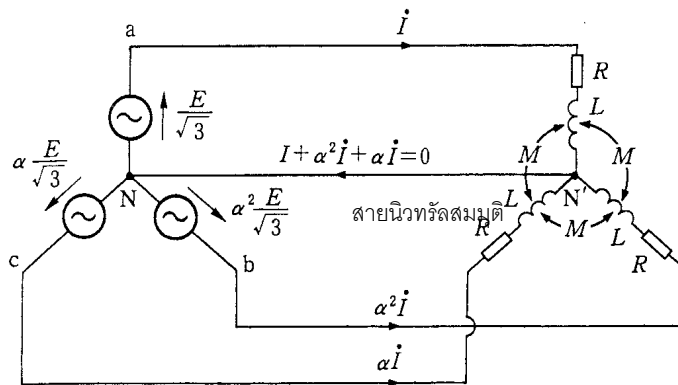
รูปที่ 1.27

วิธีทำ: เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร และภาระไฟฟ้ามีความสมดุล ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟจึงมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลของภาระไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงสามารถเชื่อมต่อทั้งสองจุดเข้าหากันได้โดยไม่มี ความเปลี่ยนแปลงใดๆ ทางไฟฟ้า

นอกจากนี้ ถ้าเราให้แรงดันเฟสของเฟส a เป็นเวกเตอร์ฐาน และใช้เวกเตอร์โอเปอเรเตอร์  $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  ในการแสดงปริมาณแล้ว จะสามารถเขียนวงจรใหม่ได้ตามรูปที่ 1.28

เมื่อใช้กฎของ Kirchoff ข้อที่ 1 กับเฟส a จะได้ว่า

$$\frac{E}{\sqrt{3}} = (R + j\omega L)I + j\omega M\alpha^2 I + j\omega M\alpha I$$



รูปที่ 1.28

$$= [R + j\omega\{L + (\alpha^2 + \alpha)M\}] \dot{i}$$

$$= \{R + j\omega(L - M)\} \dot{i}$$

เนื่องจาก  $\alpha^2 + \alpha = -1$

$$\therefore \dot{i} = \frac{\frac{E}{\sqrt{3}}}{R + j\omega(L - M)}$$

$$\therefore I = |\dot{i}| = \frac{E}{\sqrt{3}\sqrt{R^2 + \omega^2(L - M)^2}}$$

นั่นเอง

กำลังไฟฟ้าจริงต่อเฟส  $P_1$  จะเท่ากับ

$$P_1 = I^2 R = \frac{E^2 R}{3\{R^2 + \omega^2(L - M)^2\}}$$

ดังนั้น ความสูญเสียกำลังไฟฟ้า 3 เฟส  $P_3$  จะเท่ากับ

$$P_3 = 3P_1 = \frac{E^2 R}{R^2 + \omega^2(L - M)^2}$$

ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ  $S$  เนื่องจากแรงดันสายเท่ากับ  $E$  ดังนั้น

$$S = \sqrt{3}EI = \frac{E^2}{\sqrt{R^2 + \omega^2(L - M)^2}}$$

ดังนั้น เพาเวอร์แฟกเตอร์  $\cos \theta$  จึงเท่ากับ

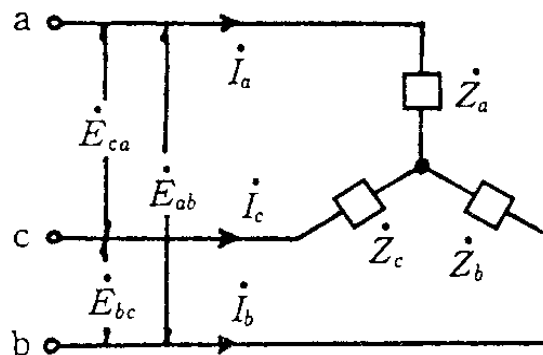
$$\cos \theta = \frac{P_3}{S} = \frac{\frac{E^2 R}{R^2 + \omega^2(L - M)^2}}{\frac{E^2}{\sqrt{R^2 + \omega^2(L - M)^2}}}$$

$$= \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2(L - M)^2}}$$

(6) วงจรกระแสสลับ 3 เฟสไม่สมดุล

ต่อไปนี้จะอธิบายวิธีการคำนวณกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสในกรณีที่ต่อภาระไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร

วิธีนี้สามารถใช้คำนวณวงจรที่ไม่มีมอเตอร์ได้ทุกวงจรโดยกระแส  $\dot{i}_a, \dot{i}_b, \dot{i}_c$  ตามวงจรในรูปที่ 1.29 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.29

เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c &= 0 \\ \dot{Z}_a \dot{I}_a - \dot{Z}_b \dot{I}_b &= \dot{E}_{ab} \\ \dot{Z}_b \dot{I}_b - \dot{Z}_c \dot{I}_c &= \dot{E}_{bc} \\ -\dot{Z}_a \dot{I}_a + \dot{Z}_c \dot{I}_c &= \dot{E}_{ca} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.20)$$

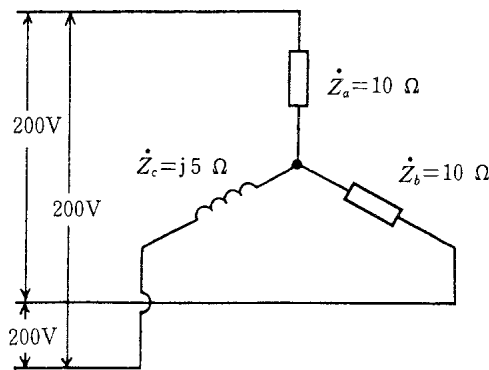
จากสูตร (1.20) เมื่อใช้สมการบนสุด 1 สมการ กับสมการอื่นอีก 2 สมการ โดยเลือก

จาก 3 สมการในสมการที่ 2 ถึง 4 และแก้สมการหลายตัวแปรเพื่อหาค่า  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{\begin{vmatrix} \dot{E}_{ab} & -\dot{Z}_b \\ \dot{E}_{ca} & -\dot{Z}_c \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \dot{Z}_a & -\dot{Z}_b \\ -(\dot{Z}_a + \dot{Z}_c) & -\dot{Z}_c \end{vmatrix}} = \frac{\dot{Z}_c \dot{E}_{ab} - \dot{Z}_b \dot{E}_{ca}}{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a} \\ \dot{I}_b &= \frac{\begin{vmatrix} \dot{Z}_a & \dot{E}_{ab} \\ -(\dot{Z}_a + \dot{Z}_c) & \dot{E}_{ca} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \dot{Z}_a & -\dot{Z}_b \\ -(\dot{Z}_a + \dot{Z}_c) & -\dot{Z}_c \end{vmatrix}} = \frac{-\dot{Z}_a \dot{E}_{ca} - (\dot{Z}_a + \dot{Z}_c) \dot{E}_{ab}}{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a} \\ &= \frac{\dot{Z}_a \dot{E}_{bc} - \dot{Z}_c \dot{E}_{ab}}{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a} \\ \dot{I}_c &= \frac{\begin{vmatrix} -\dot{Z}_b & \dot{E}_{bc} \\ -\dot{Z}_a & \dot{E}_{ca} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\dot{Z}_b & -(\dot{Z}_b + \dot{Z}_c) \\ -\dot{Z}_a & \dot{Z}_c \end{vmatrix}} = \frac{\dot{Z}_b \dot{E}_{ca} - \dot{Z}_a \dot{E}_{bc}}{\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_c \dot{Z}_a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.21)$$

ตัวอย่าง 1.10 ในรูปที่ 1.30 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับสมมาตรแรงดัน 200V จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระไฟฟ้า 3 เฟสที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัวกับรีแอกแทนซ์เหนี่ยวนำ 1 ตัวต่อแบบสตาร์ จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสและความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า 3 เฟสนี้

วิธีทำ: ในรูปที่ 1.30 เมื่อให้



รูปที่ 1.30 วงจรภาระไฟฟ้า 3 เฟส

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ab} &= 200 \text{ V} & \dot{Z}_a &= 10 \text{ } \Omega \\ \dot{E}_{bc} &= 200 \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{ V} & \dot{Z}_b &= 10 \text{ } \Omega \\ \dot{E}_{ca} &= 200 \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{ V} & \dot{Z}_c &= j5 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

แล้วนำลงไปแทนค่าในสูตร (1.21) เพื่อหากระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟส จะได้ว่า

$$i_a = 5(2 - \sqrt{3} - j\sqrt{3}) \text{ A}$$

$$i_b = -5(2 + \sqrt{3} + j\sqrt{3}) \text{ A}$$

$$i_c = 10\sqrt{3}(1 + j) \text{ A}$$

ดังนั้น

$$|i_a| = 5\sqrt{10 - 4\sqrt{3}} = 8.8 \text{ A}$$

$$|i_b| = 5\sqrt{10 + 4\sqrt{3}} = 20.6 \text{ A}$$

$$|i_c| = 10\sqrt{6} = 24.5 \text{ A}$$

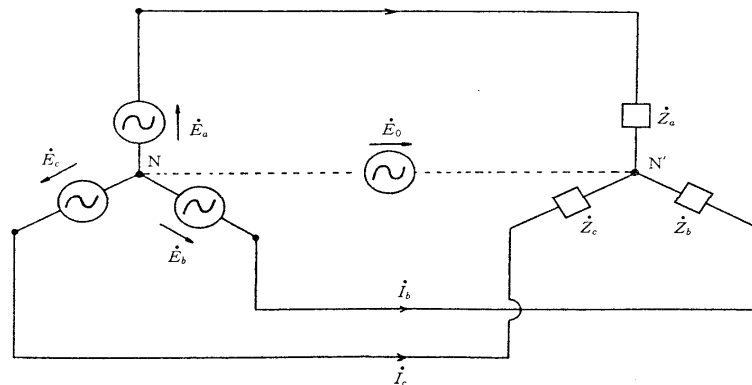
ความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า P จะเท่ากับ

$$P = 10 \times (5\sqrt{10 - 4\sqrt{3}})^2 + 10 \times (5\sqrt{10 + 4\sqrt{3}})^2$$

$$= 5 \text{ kW}$$

(b) วิธีสมมติศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัล

วิธีนี้เป็นการประยุกต์กฎของ Kirchhoff ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้หลายกรณี ในวงจรกระแสสลับ 3 เฟส 3 สาย เช่นในรูป 1.29 เมื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในของละเฟสเท่ากับ  $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$  ให้จุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟเป็น N ให้จุดนิวทรัลของภาระไฟฟ้าเป็น N' ให้อิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าของแต่ละเฟสเท่ากับ  $Z_a, Z_b, Z_c$  แล้ว จะเป็นดังรูปที่ 1.31 กล่าวคือ



รูปที่ 1.31

ในรูปที่ 1.31 กรณีที่ภาระไฟฟ้าไม่สมดุล ระหว่างจุดนิวทรัลของภาระไฟฟ้า N' กับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟ N จะเกิดความต่างศักย์ขึ้นค่าหนึ่ง สมมติว่าความต่างศักย์นี้มีค่าเท่ากับ  $E_0$  และใช้กฎของ Kirchhoff กับรูปที่ 1.31 แล้ว

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_a - \dot{E}_0 &= Z_a i_a \rightarrow i_a = \frac{\dot{E}_a - \dot{E}_0}{Z_a} \\ \dot{E}_b - \dot{E}_0 &= Z_b i_b \rightarrow i_b = \frac{\dot{E}_b - \dot{E}_0}{Z_b} \\ \dot{E}_c - \dot{E}_0 &= Z_c i_c \rightarrow i_c = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_0}{Z_c} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.22)$$

และ  $i_a + i_b + i_c = 0 \dots\dots\dots (1.23)$

นำสูตร (1.22) แทนค่าลงในสูตร (1.23)

$$\frac{\dot{E}_a - \dot{E}_0}{\dot{Z}_a} + \frac{\dot{E}_b - \dot{E}_0}{\dot{Z}_b} + \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_0}{\dot{Z}_c} = 0$$

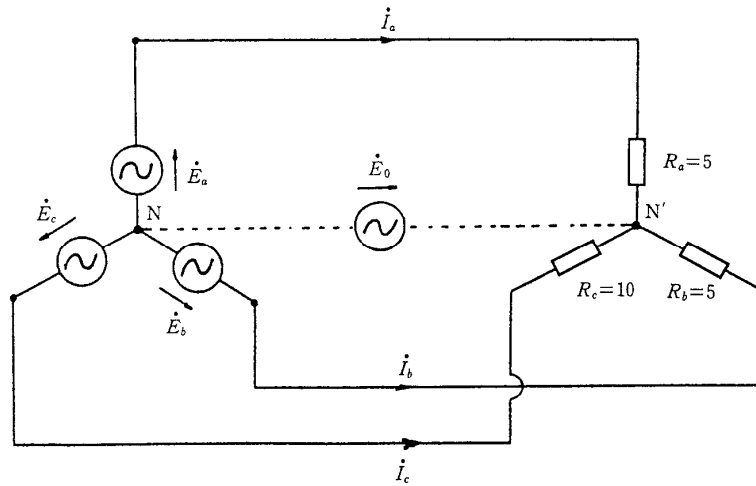
ดังนั้น

$$\dot{E}_0 = \frac{\frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_a} + \frac{\dot{E}_b}{\dot{Z}_b} + \frac{\dot{E}_c}{\dot{Z}_c}}{\frac{1}{\dot{Z}_a} + \frac{1}{\dot{Z}_b} + \frac{1}{\dot{Z}_c}} = \frac{\sum \frac{\dot{E}}{\dot{Z}}}{\sum \frac{1}{\dot{Z}}} \dots\dots\dots(1.24)$$

เมื่อกำหนด  $\dot{E}_0$  จากสูตรนี้ แทนค่ากลับเข้าไปใน (1.22) จะหาค่า  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  ได้สูตร (1.24) เรียกว่า Millman's theorem

ตัวอย่าง 1.11 ในรูปที่ 1.32 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟสสมมาตรมีแรงดัน 200V จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระไฟฟ้าที่มีความต้านทาน 5Ω, 5Ω, 10Ω ต่อแบบสตาร์ จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสและความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า 3 เฟส

วิธีทำ: ในรูป 1.32



รูปที่ 1.32

เมื่อนำ  $\dot{E}_a = \frac{200}{\sqrt{3}}$ ,  $\dot{E}_b = \alpha^2 \frac{200}{\sqrt{3}}$ ,  $\dot{E}_c = \alpha \frac{200}{\sqrt{3}}$ ,  $R_a = R_b = 5\Omega$ ,  $R_c = 10\Omega$  แทนค่าลงใน

สูตร (1.24) จะได้ว่า

$$\dot{E}_0 = \frac{\frac{\dot{E}_a}{R_a} + \frac{\dot{E}_b}{R_b} + \frac{\dot{E}_c}{R_c}}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c}} = \frac{20}{\sqrt{3}} - j20 \text{ V}$$

ดังนั้น จากสูตร (1.22)

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_a - \dot{E}_0}{R_a} = 12\sqrt{3} + j4 \quad |\dot{I}_a| = 8\sqrt{7} = 21.2 \text{ A}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{E}_b - \dot{E}_0}{R_b} = -8\sqrt{3} - j16 \quad |\dot{I}_b| = 8\sqrt{7} = 21.2 \text{ A}$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{E}_c - \dot{E}_0}{R_c} = -4\sqrt{3} - j12 \quad |\dot{I}_c| = 8\sqrt{3} = 13.9 \text{ A}$$

$$P = (R_a |\dot{I}_a|^2 + R_b |\dot{I}_b|^2 + R_c |\dot{I}_c|^2) \times 10^{-3} = 6.4 \text{ kW}$$

### 1.1.5 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ในระยะแรกนั้น วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีลักษณะการใช้งานที่สำคัญทางด้านการสื่อสารด้วยสัญญาณความถี่สูงและทางด้านการขยายสัญญาณ ต่อมาปี พ.ศ. 2490 จึงเริ่มมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า การค้นพบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์และไทรสเตอร์ ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความเชื่อถือที่สูงได้ ทำให้วงการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมด้านการควบคุมกระบวนการผลิตโดยอัตโนมัติได้อย่างดี

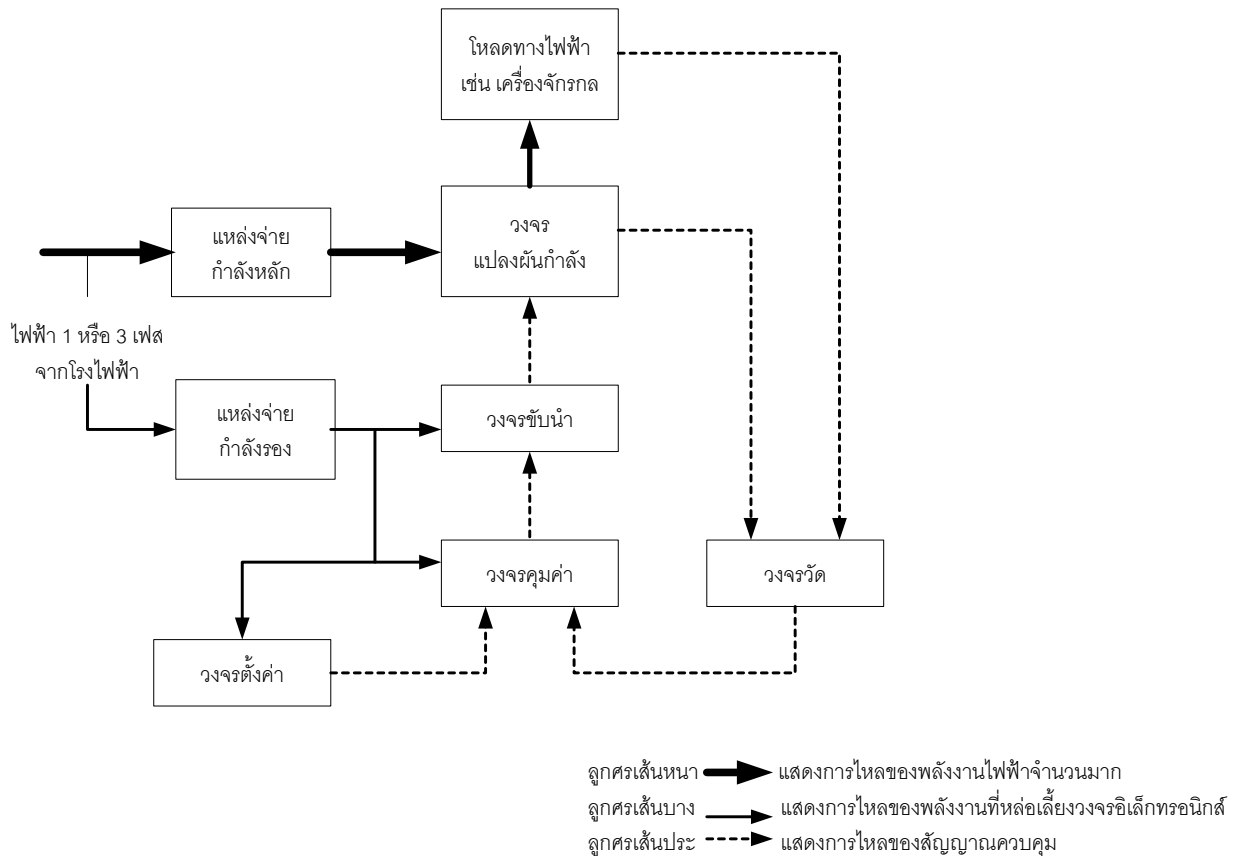
นอกจากจะใช้ในการสื่อสารและการควบคุมแล้ว ประโยชน์ที่สำคัญของไฟฟ้าก็คือการนำมาใช้เป็นพลังงาน วิธีการหนึ่งในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าคือการใช้สวิตช์ การแปลงผันเช่นนี้จะมีประสิทธิภาพที่สูง เพราะกำลังการสูญเสียในสวิตช์มักมีค่าต่ำ เราเคยใช้รีเลย์กลไฟฟ้าเป็นสวิตช์ แต่สวิตช์เช่นนี้ทำงานได้ดีที่ความถี่ต่ำ อันที่จริงไดโอดก็ทำหน้าที่เป็นสวิตช์แบบหนึ่ง แต่ทรานซิสเตอร์และไทรสเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์ได้ดีกว่า เพราะสามารถควบคุมได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เราเรียกสวิตช์เช่นนี้ว่าสวิตช์สถิต (Static Switch) และเรียกววงจรแปลงผันพลังงานที่ใช้สวิตช์เช่นนี้ว่าวงจรแปลงผันสถิต (Static Converter) ทั้งนี้โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างกับรีเลย์ซึ่งเป็นสวิตช์ที่มีการเคลื่อนไหวของหน้าสัมผัส

เมื่อเราใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมและขับนำสวิตช์ และวงจรทั้งหมดสามารถแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก เราจึงเรียกววงจรเช่นนี้ว่า “วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง” อนึ่ง การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้มีความสะดวกในการควบคุมพลังงานไฟฟ้า ทั้งการควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop) และ วงรอบปิด (Closed Loop) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลัง และระบบควบคุม ดังรูปที่ 1.33 แสดงแผนภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วย วงจรกำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุม



รูปที่ 1.33 แผนภาพระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รูปที่ 1.34 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวอย่างของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรคุมค่า (Regulator) วงจรตั้งค่าตัวแปร (Variable – Setting) วงจรวัดซึ่งมักจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงอนุมาณ (Analog) หรือเชิงตัวเลข (Digital) แต่หน้าที่ของวงจร จะเป็นไปในด้านการควบคุม ส่วนวงจรกำลังทำหน้าที่แปลงผันพลังงานให้เหมาะสมกับโหลด



รูปที่ 1.34 แผนภาพของตัวอย่างระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

### 1.1.5.1 ลักษณะและหน้าที่ของวงจรวจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

#### (1) นิยาม

อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นวิชาที่ว่าด้วยการแปลงผันพลังงานโดยใช้สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสวิตช์

#### (2) องค์ประกอบวงจร

วงจรวจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จะกล่าวถึงตอนนี้กล่าวถึง “วงจรวจรแปลงผันกำลังแบบอิเล็กทรอนิกส์”(วงจรมีพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่แสดงดังรูปที่ 1.34 ในสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไฟฟ้ากำลัง ประสิทธิภาพเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ถ้าตัวต้านทานอยู่ในฐานะเป็นโหลดคือเอาพลังงานไปใช้ประโยชน์อะไรก็ไม่เป็นไร แต่ถ้าเอา ตัวต้านทานไปใส่ไว้ในส่วนอื่นๆ อาจทำให้เกิดกำลังสูญเสียโดยไม่จำเป็น จึงกล่าวได้ว่าเราไม่นิยมตัวต้านทานในวงจรวจรกำลัง ในด้านองค์ประกอบไวงานคงจะต้องตัดสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เจึงเส้นออกไปด้วยเหตุผลเดียวกัน ก็จะทำให้เกิดความสูญเสียโดยไม่จำเป็น ข้อแตกต่างระหว่างไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ตรงที่ว่า ในวิชาไฟฟ้ากำลังจะนิยมใช้เครื่องกลไฟฟ้ามากกว่าส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลังจะนิยมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสวิตช์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก (ดูรูปที่ 1.35 (ข) และ (ค))

R	C	L	หม้อ แปลง
สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เชิงเส้น		สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ สวิตชิง	เครื่องกล ไฟฟ้า

(ก) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางอิเล็กทรอนิกส์

R	C	L	หม้อแปลง
สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เชิงเส้น		สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ สวิตชิง	เครื่องกลไฟฟ้า

(ข) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

R	C	L	หม้อ แปลง
สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เชิงเส้น		สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ สวิตชิง	เครื่องกล ไฟฟ้า

(ค) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางไฟฟ้ากำลัง

### รูปที่ 1.35 แสดงองค์ประกอบหลักของวงจรชนิดต่างๆ

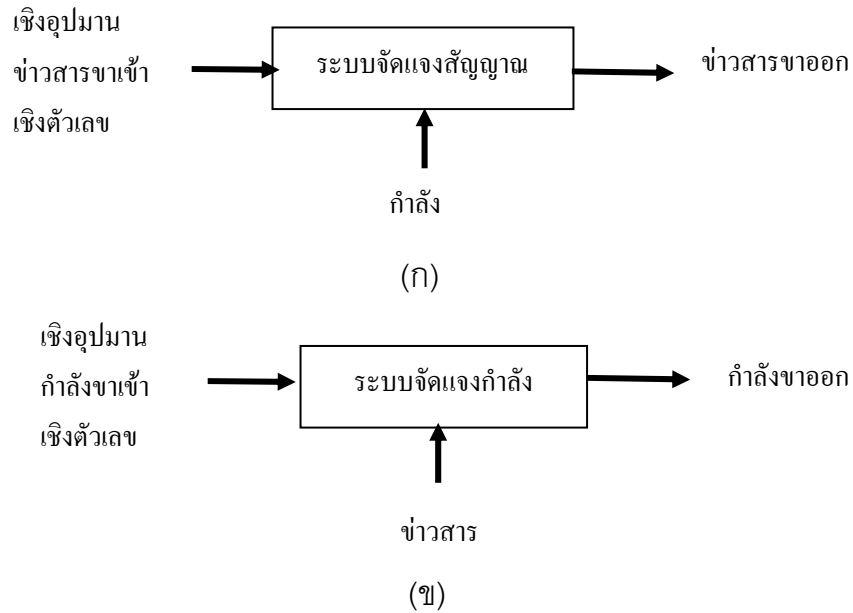
#### (3) ความถี่และกำลัง

ในเรื่องความถี่การทำงานของวงจร กล่าวได้ว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่กว้างขวางมาก คือตั้งแต่ไฟตรงไปจนถึงจิกะเฮิร์ตซ์ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ BJT และ FET ที่ให้กำลังได้ถึงหลายสิบกิโลวัตต์ SCR ที่ให้กำลังได้ถึงประมาณเมกะวัตต์ และไดโอดที่ใช้ในวงจรได้ถึงหลายเมกะวัตต์ กล่าวได้ว่ายิ่งกำลังมีค่าสูงกว่าความถี่ก็จะยิ่งน้อยลง ทรานซิสเตอร์กำลังทำงานแบบสวิตชิงได้หลายร้อยกิโลเฮิร์ตซ์ SCR ทำงานได้หลายกิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนไดโอดกำลังสูงมักจะใช้ในการเรียงกระแส 50 Hz ในด้านเครื่องกลไฟฟ้านั้นความถี่จะถูกกำหนดโดยอัตราความเร็วในการหมุน โดยทั่วไปจะเป็น 50 Hz ถึง 400 Hz

เมื่อพิจารณาในแง่กำลัง การแบ่งเขตแดนย่อมทำได้ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตาม วงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีกำลังต่ำคือ ประมาณไม่เกิน 10 ถึง 100 W วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจมีกำลังตั้งแต่กิโลวัตต์ถึงเมกะวัตต์ ส่วนในด้านไฟฟ้ากำลังนั้นอาจมีกำลังตั้งแต่กิโลวัตต์ถึงจิกะวัตต์

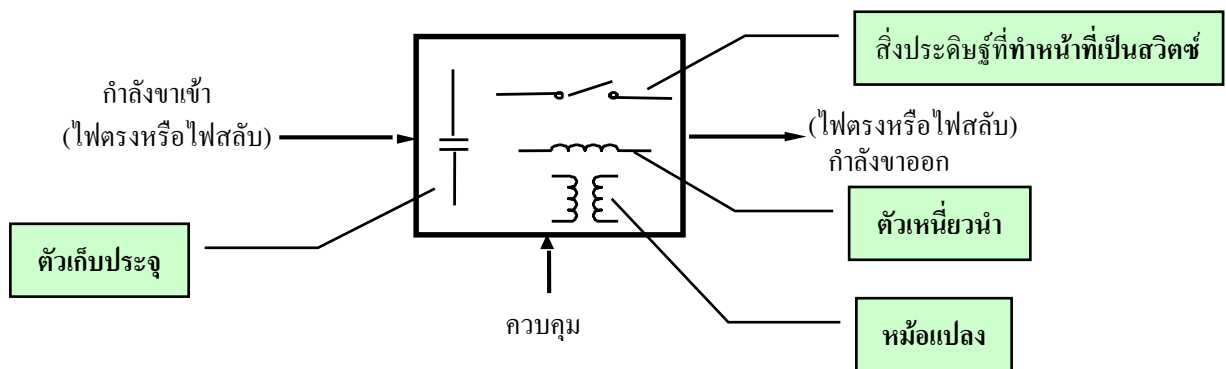
(4) หน้าที่หลัก

หน้าที่หลักของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังคือ การจัดแจงกำลัง (Power Processing) ในแง่นี้จะต่างจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตรงที่ว่า หน้าที่หลักของวงจรอิเล็กทรอนิกส์คือ การจัดแจงสัญญาณ (Signal Processing) เราจะเขียนแผนภาพแสดงความแตกต่างของหน้าที่ได้ดังรูปที่ 1.36



รูปที่ 1.36 แผนภาพจำแนกระบบจัดแจงสัญญาณและระบบการจัดแจงกำลัง

ถ้าเขียนแผนภาพบล็อกของวงจรแปลงผันกำลังซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นว่องค์ประกอบที่สำคัญ คือ C,L และหม้อแปลง และสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ต่อรวมอยู่ด้วยกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.37

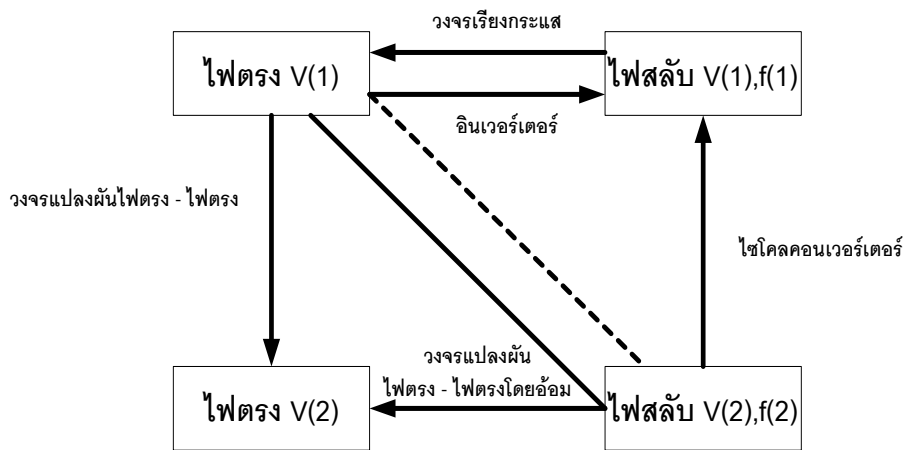


รูปที่ 1.37 แผนภาพบล็อกของวงจรแปลงผันกำลังแบบอิเล็กทรอนิกส์ (แสดงองค์ประกอบหลักของวงจร)

วงจรแปลงผันกำลังจะมีชื่อเรียกเฉพาะลงไปอีก แล้วแต่หน้าที่ของมัน เช่น

- วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรง มีชื่อเรียกว่า วงจรชอปเปอร์ (Choppers)
- วงจรแปลงผันไฟสลับ – ไฟตรง มีชื่อเรียกว่า วงจรเรียงกระแส (Rectifiers)  
วงจรรีเรียงกระแสควบคุม (Controller Rectifiers) ฯลฯ
- วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับ มีชื่อเรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
- วงจรแปลงผันไฟสลับ – ไฟสลับ มีชื่อเรียกว่า วงจรควบคุมแรงดันไฟสลับ (AC voltage control)  
วงจรรักษาคุณภาพไฟสลับไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverters)  
วงจรถูกตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ฯลฯ

นอกจากนี้การแปลงผันอาจจะกระทำได้อีกโดยอ้อม เช่น การแปลงผันไฟตรง – ไฟตรง โดยอ้อม กระทำได้โดยการแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับ ตามด้วยการแปลงผันไฟสลับ – ตรง รูปที่ 1.38 แสดงหน้าที่การแปลงผันพลังงานของวงจรต่าง ๆ



รูปที่ 1.38 แสดงวงจรและหน้าที่การแปลงผันพลังงาน

(5) สรุปลักษณะและหน้าที่

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำการแปลงผันพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (บางครั้งกว่า 95%) และสามารถควบคุมปริมาณขาออก เช่น ขนาดของแรงดันและความถี่ได้โดยสะดวก นอกจากนี้ถ้าวงจรทำงานที่ความถี่สูง องค์ประกอบวงจร เช่น ตัวเหนี่ยวนำ หม้อแปลง และตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำงานที่ความถี่สูงจึงมีขนาดเล็กกะทัดรัดและเบา

ข้อเสียของอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็มี อาทิเช่น วงจรทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์และออกแบบแล้วยังมีปัญหาค่าความเชื่อถือได้ของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ ตลอดจนปัญหาอันเนื่องมาจากการสวิตช์ ซึ่งได้แก่ การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI)

อิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาและการแยกตัวออกเป็นสาขาเอกเทศ จึงได้มีการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจนมีสมรรถนะที่ดีขึ้นตามลำดับ ทำให้สามารถขยายขอบเขตการประยุกต์ให้กว้างขวางออกไป

### 1.1.5.2 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง

ตาราง 1.2 ประเภทของอุปกรณ์วาล์วสำหรับไฟฟ้ากำลังที่สำคัญ

อุปกรณ์	ทิศทาง	การทำงานแบบ ON	การทำงานแบบ OFF
ไดโอดกรงกระแสตรง	1	×	×
ไทรสเตอร์ (ไทรสเตอร์ 3 ขั้วป้องกันกระแสไหลกลับทิศ)	1	○	×
GTO (Gate Turn-off Thyristor)	1	○	○
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)	1	○	○
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	1	○	○
ไทรแอก	2	○	×
Reverse conducting thyristor	2	○	×

#### (1) ประเภท

อุปกรณ์วาล์วสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นเครื่องแปลงกำลังไฟฟ้ามีทั้งไดโอด ไทรสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ เฟต (FET) เป็นต้น เราสามารถแบ่งอุปกรณ์เหล่านี้ตามหน้าที่การทำงานได้ดังต่อไปนี้

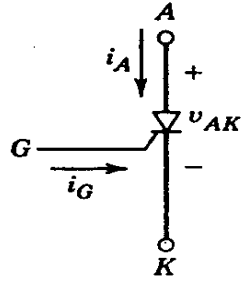
- ทิศทางของกระแส : กระแสไหลได้ทิศทางเดียวหรือสองทิศทาง
- การทำงานแบบ ON : อุปกรณ์ที่เปลี่ยนสถานะจาก OFF เป็น ON ได้ด้วยสัญญาณควบคุม ขณะที่มีความดันบวกจ่ายอยู่
- การทำงานแบบ OFF : อุปกรณ์ที่เปลี่ยนสถานะจาก ON เป็น OFF ได้ด้วยสัญญาณควบคุม ขณะที่มีความดันจ่ายอยู่

#### (2) คุณสมบัติ

- ไทรสเตอร์ : โดยทั่วไปคำว่าไทรสเตอร์จะหมายถึงไทรสเตอร์ 3 ขั้วสำหรับป้องกันกระแสไหลกลับทิศ อุปกรณ์นี้ไม่มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็น ON แล้วแม้ว่าจะหยุดป้อนสัญญาณควบคุม กระแสก็ยังสามารถไหลผ่านได้ต่อไป การเปลี่ยนสถานะเป็น OFF ต้องใช้วงจรถูกออกแบบให้ต่ำกว่ากระแสโหดดึง หรือป้อนแรงดันกลับชั่วระหว่างขั้วบวก-ขั้วลบเป็นระยะเวลาหนึ่ง
- GTO : อุปกรณ์นี้มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อให้กระแสควบคุมลบจะเปลี่ยนสถานะเป็น OFF
- ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ IGBT และเพาเวอร์ MOSFET : อุปกรณ์นี้มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อหยุดป้อนสัญญาณควบคุมจะเปลี่ยนสถานะเป็น OFF แต่หากได้รับแรงดันกลับชั่วแม้เพียงเล็กน้อยจะเสียหายทันที ดังนั้น หากมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันกลับชั่วจะใช้ไดโอดต่อนุกรมหรือต่อขนานไว้ด้วย
- ไทรแอก : กระแสไหลได้สองทิศทาง ไม่แยกขั้วบวกขั้วลบ ไม่มีการทำงานแบบ OFF โดยมีคุณลักษณะคล้ายกับไทรสเตอร์

(4) รูปร่างและสัญลักษณ์

SCR (Silicon Control Rectifier) [Thyristor Devices]

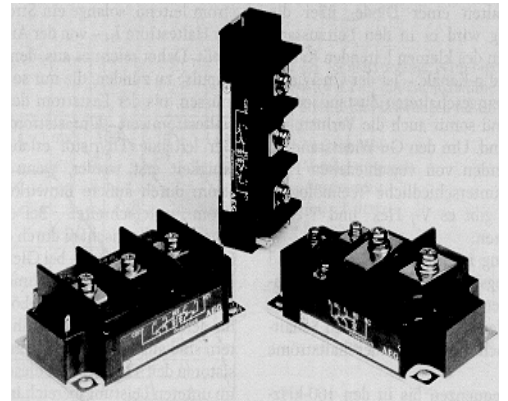
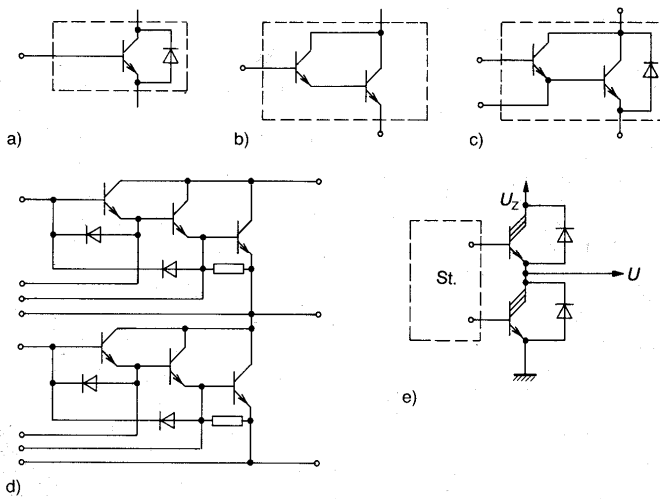


(ก) สัญลักษณ์



(ข) รูปร่างลักษณะ

Bipolar Transistor (BT)

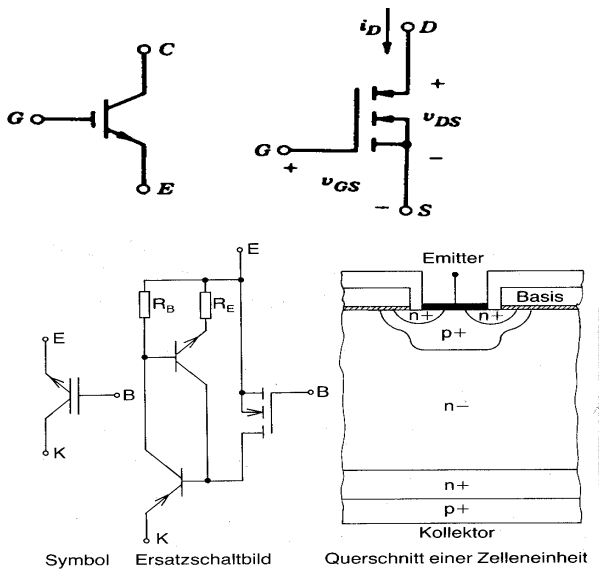


(ก) จากรูป a-c เป็นภาพสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบต่างๆ

(ข) รูปร่างลักษณะ

รูปที่ 1.39 รูปร่างและสัญลักษณ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง

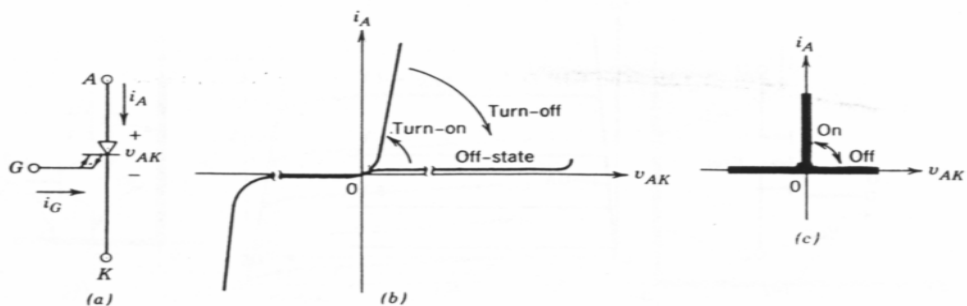
**Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)**



สัญลักษณ์ วงจรสมมูลและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ IGBT

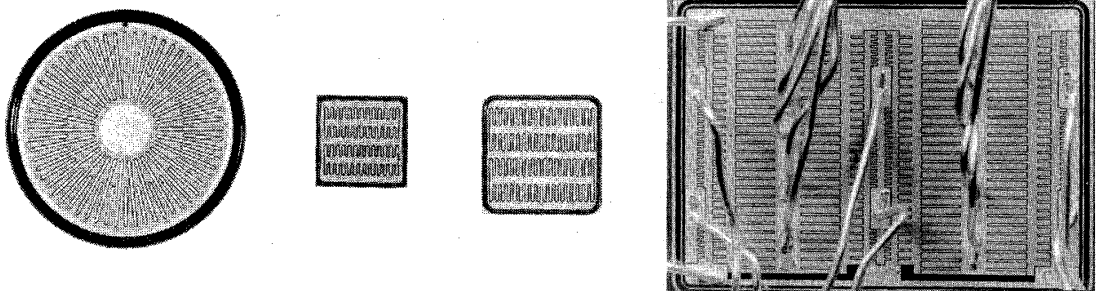
IGBT – Module และภาพภายในของอุปกรณ์

**Gate-Turn-Off THYRISTOR (GTO)**



A GTO: (a) symbol, (b)  $i-t$  characteristics, (c) idealized characteristics.

(ก) สัญลักษณ์และคุณลักษณะ



(ข) รูปร่างลักษณะ

รูปที่ 1.40 รูปร่างและสัญลักษณ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

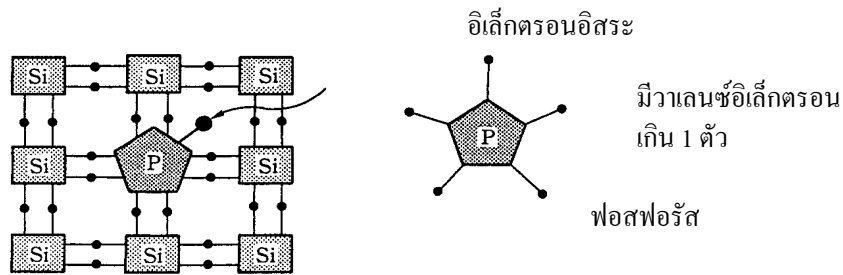
### 1.1.6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์

#### (1) สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีอัตราความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับฉนวนไฟฟ้า โดยมีอัตราความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $10^5 - 10^4 \Omega$  ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน เยอรมาเนียม เป็นต้น สารกึ่งตัวนำแบ่งเป็น “สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์” ซึ่งแทบไม่มีสารเจือปนใดๆ กับ “สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์” ที่มีสารอื่นเจือปนเล็กน้อย สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ยังแบ่งออกได้เป็น “สารกึ่งตัวนำชนิด p” กับ “สารกึ่งตัวนำชนิด n” อีกด้วย

#### (2) สารกึ่งตัวนำชนิด n

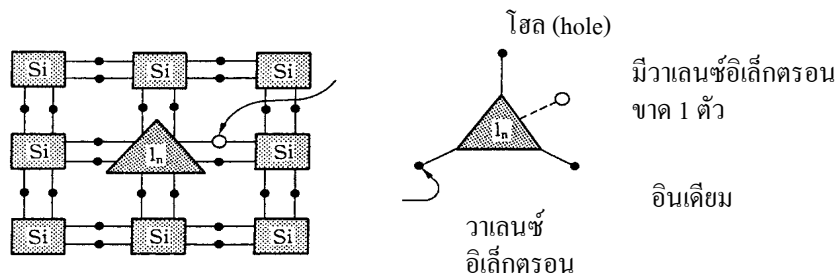
สารกึ่งตัวนำชนิด n มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.41 เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 4 เช่น ซิลิกอน นำมาเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 5 (Donor) เช่น ฟอสฟอรัส ฯลฯ ลงไปเล็กน้อย ในผลึกของสารนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเกินอยู่ 1 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระสามารถนำไฟฟ้าได้ อิเล็กตรอนอิสระและโฮล (Hole) ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้านี้ เรียกว่า พาหะ (Carrier)



รูปที่ 1.41 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด n

#### (3) สารกึ่งตัวนำชนิด p

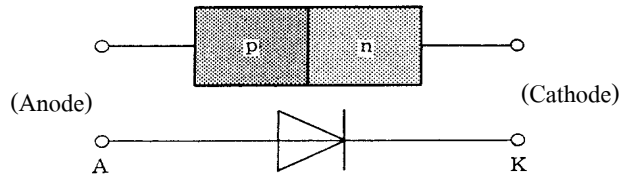
สารกึ่งตัวนำชนิด p มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.42 เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 4 เช่น ซิลิกอน นำมาเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 3 (Acceptor) เช่น โบรอน อินเดียม ฯลฯ ลงไปเล็กน้อย ในผลึกของสารนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนขาดอยู่ 1 ตัว ทำให้เกิดโฮล (Hole) ขึ้นตรงจุดนั้น และทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 1.42 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด p

(4) ไดโอด

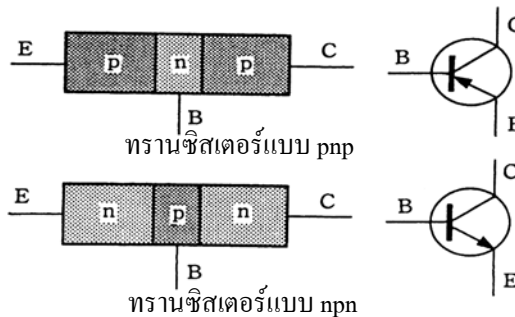
ไดโอดเป็นอุปกรณ์ (Device) 2 ขั้ว ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n นำมาต่อกันดังรูปที่ 1.43 ไดโอดแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น Point-contact diode กับ Junction diode มีหน้าที่การทำงานเป็น Rectifier และ Detection



รูปที่ 1.43 โครงสร้างและสัญลักษณ์ไดโอด

(5) ทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์มีโครงสร้างดังรูป 1.44 เป็นการนำสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n มาประกอบกัน 3 ชั้นแบบ pnp หรือแบบ npn มีหน้าที่การทำงานในการขยายสัญญาณหรือกำเนิดสัญญาณ สารกึ่งตัวนำทั้งสามชั้นมีชื่อว่า Base (B), Emitter (E) และ Collector (C)



รูปที่ 1.44 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์

ตัวอย่าง 1.12 จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องจากตัวเลือกที่ให้มา เติมลงในวงเล็บ

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 4 เช่น ซิลิกอน มาเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ (1) ลงไปเล็กน้อยแล้ว ทฤษฎี Band theory อธิบายว่าที่บริเวณใกล้เคียง (2) จะเกิด (3) Level ขึ้น และในสำหรับกึ่งตัวนำชนิด p เมื่อเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ (4) ลงไปเล็กน้อยแล้ว ที่บริเวณใกล้เคียง (5) จะเกิด (6) ขึ้น

(ตัวเลือก)

- |                  |                    |                     |                |
|------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| (ก) 3            | (ข) 4              | (ค) 5               | (ง) 6          |
| (จ) Valence band | (ฉ) Forbidden band | (ช) Conduction band | (ซ) อิเล็กตรอน |
| (ฉ) โสล          | (ญ) เยอรมาเนียม    | (ฎ) โบรอน           | (ฏ) Fermi      |
| (ฐ) Donor        | (ฑ) Acceptor       | (ฒ) วงโคจร          |                |

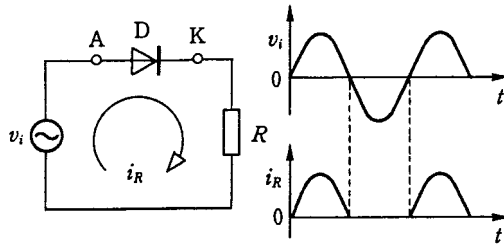
วิธีทำ: (1)-(ค) (2)-(ข) (3)-(ฐ) (4)-(ก) (5)-(จ) (6)-(ท)

**คำอธิบาย** เมื่อคำนึงถึงโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ อิเล็กตรอนจะโคจรอยู่รอบนิวเคลียส โดยมีวงโคจรหลายวง ยิ่งอิเล็กตรอนอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางเท่าใด พันธะกับอะตอมก็ยิ่งแข็งแรงขึ้นเท่านั้น วงจรโคจรที่มีอิเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมากเรียกว่า Band โดยวงโคจรชั้นนอกสุดและไกลออกไปกว่านั้นแบ่งออกเป็น Valence band, Forbidden band และ Conduction band ในสารกึ่งตัวนำชนิด n พาหะจะอยู่ใน Donor level ซึ่งอยู่ใกล้กับ Conduction band ในขณะที่ในสารกึ่งตัวนำชนิด p พาหะจะอยู่ใน Acceptor level ซึ่งอยู่ใกล้ Valence band

### 1.1.6.1 วงจร Rectifier

(1) Half-wave rectifier

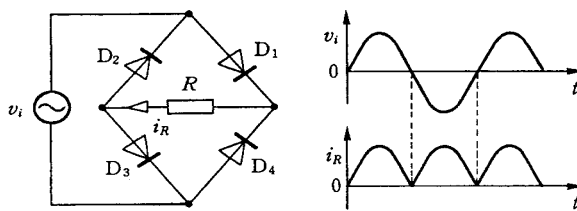
เมื่อต่อไดโอดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 1.45 กระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็น Half wave



รูปที่ 1.45 วงจร Half-wave rectifier

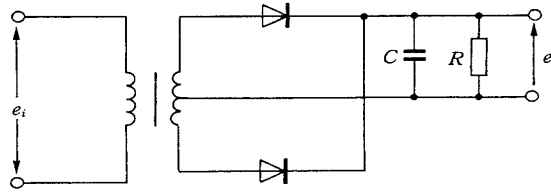
(2) Full-wave rectifier

วงจรดังรูปที่ 1.46 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันทั้งในช่วงคลื่นบวกและลบ ได้คลื่นรูป Full wave



รูปที่ 1.46 วงจร Full-wave rectifier

ตัวอย่าง 1.13 ในวงจร Rectifier ที่ประกอบด้วยไดโอดครึ่งรูปที่ 1.47 ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ C และตัวต้านทาน R เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์เท่ากับ  $e_i$  ให้ที่ขาเข้าแล้ว แรงดันไฟฟ้า  $e_o$  ที่ขาออกจะมีรูปคลื่นเป็นอย่างไร



รูปที่ 1.47

วิธีทำ: ในวงจร Full-wave rectifier ที่ใช้ Center tap กรณีที่ภาระไฟฟ้ามีแต่ตัวต้านทาน R อย่างเดียวนั้น วงจรจะกลับคลื่นลบจากแหล่งจ่ายไฟให้เป็นบวก ทำให้ได้ Full-wave rectified wave ดังรูปที่ 1.48 (a) แต่เมื่อต่อ C ขนานกับ R แล้ว C จะถูกประจุไฟและคายประจุสลับกันไปมา ทำให้รูปคลื่นขาออกมีลักษณะที่ยกส่วนที่ต่ำขึ้นมาเหมือนรูป (b)



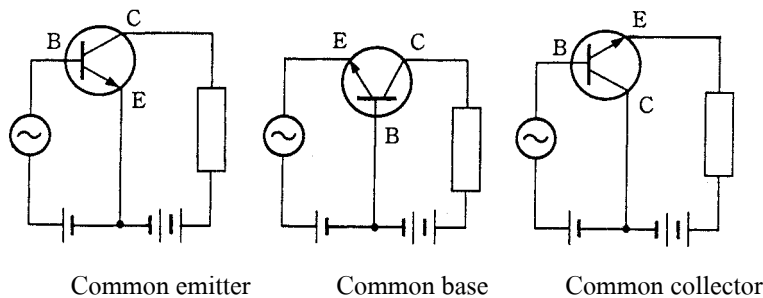
รูปที่ 1.48

### 1.1.6.2 วงจรขยาย

(1) วิธีต่อลงกราวด์กับวงจรขยาย

วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ Common emitter, Common base และ Common collector ขึ้นอยู่กับจะใส่ขาใดเป็นจุดร่วม หรือจุดต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 1.49 โดยทั่วไป วงจร Common emitter จะนิยมใช้กันที่สุด ตาราง 1.3 จะแสดงคุณสมบัติของการต่อวงจรแต่ละแบบ

อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแส Collector  $\Delta I_C$  ต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส base  $\Delta I_B$  หรือ  $(\Delta I_C / \Delta I_B)$  ในวงจร Common emitter เรียกว่า อัตราขยายกระแส Common emitter เขียนแทนด้วย  $\beta$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส Collector ต่อกระแส Emitter ในวงจร Common base เรียกว่า อัตราขยายกระแส Common base เขียนแทนด้วย  $\alpha$



รูปที่ 1.49 วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์

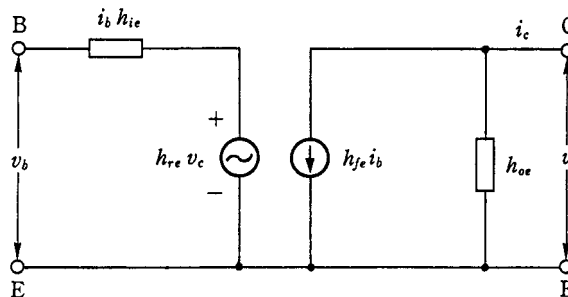
ตาราง 1.3 คุณสมบัติของวิธีการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แบบต่างๆ

วิธีต่อวงจร	Common base	Common emitter	Common collector
ห้วข้อ			
อิมพีแดนซ์ขาเข้า	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
อิมพีแดนซ์ขาออก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Voltage gain	ปานกลาง	สูง	ไม่มี ( $\approx 1$ )
Current gain	ไม่มี ( $\approx 1$ )	สูง	สูง
Power gain	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
Frequency characteristic	ดี	ไม่ดี	ดี
Phase shift แรงดันขาออก-เข้า	เฟสตรงกัน	เฟสกลับกัน	เฟสตรงกัน

(2) Four-terminal constants (h-parameter)

h-parameter เป็นค่าคงที่เมื่อพิจารณาวงจรทรานซิสเตอร์ 4 ขั้ว โดยมีขั้ว Input จำนวน 2 ขั้ว และขั้ว Output จำนวน 2 ขั้ว ประกอบด้วย อิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อลัดวงจรขาออก ( $h_i$  [ $\Omega$ ]) Voltage feedback ratio เมื่อเปิดวงจรขาเข้า ( $h_r$ ) อัตราขยายกระแสเมื่อลัดวงจรขาออก ( $h_f$ ) แอดมิแตนซ์ขาออกเมื่อเปิดวงจรขาเข้า ( $h_o$  [S]) และเพิ่มตัวห้อยเพื่อแสดงวิธีการต่อวงจรแต่ละแบบ ในจำนวน h-parameter ต่างๆ  $h_r$  และ  $h_o$  จะมีค่าน้อยมากเทียบกับ  $h_i$  และ  $h_f$  ดังนั้นในหลายกรณีจึงจะไม่เขียนไว้

รูปที่ 1.50 แสดงวงจรสมมูลของวงจร Common emitter โดยแสดงด้วย h-parameter ค่า h-parameter ต่างๆ มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.50 วงจรสมมูลของวงจร Common emitter

$$h_{ie} = \Delta V_{BE} / \Delta I_B, \quad h_{re} = \Delta V_{BE} / \Delta V_{CE}, \quad h_{fe} = \Delta I_C / \Delta I_B, \quad h_{oe} = \Delta I_C / \Delta V_{CE}$$

ทั้งนี้

$\Delta V_{BE}$  : การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Base กับ Emitter

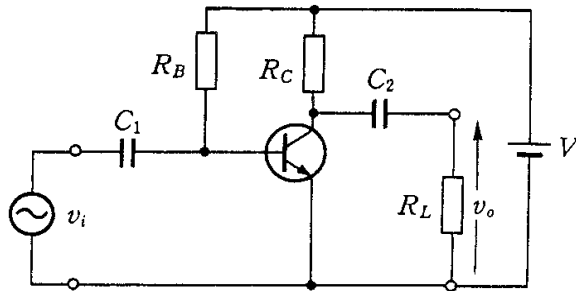
$\Delta I_B$  : การเปลี่ยนแปลงกระแส Base

$\Delta V_{CE}$  : การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Collector กับ Emitter

$\Delta I_C$  : การเปลี่ยนแปลงกระแส Collector

ตัวอย่าง 1.14 รูปที่ 1.51 แสดงวงจรขยายทรานซิสเตอร์ที่เรียกว่า Fixed bias circuit ถ้าตัวต้านทาน  $R_B = 500 \Omega$ ,  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ , h-parameter  $h_{ie} = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $h_{fe} = 200$  แล้ววงจรนี้จะมี Voltage gain เท่ากับกี่ [dB] (เดซิเบล)

- (1)40.3                      (2)41.5                      (3)42.9                      (4)43.3                      (5)44.1

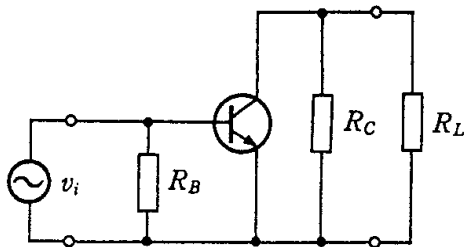


รูปที่ 1.51

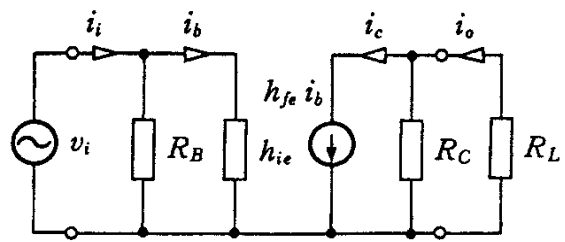
วิธีทำ: เมื่อมองจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ  $v_i$  คาปาซิเตอร์  $C_1$  และ  $C_2$  จะมีความจุไฟฟ้าสถิตสูงมาก (5-100  $\mu\text{F}$ ) จนถือได้ว่ามีรีแอกแตนซ์น้อยมาก ดังนั้นสำหรับไฟฟ้กระแสสลับจึงเสมือนกับการลัดวงจร (ต่อตรง) นอกจากนี้ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $V$  ก็พิจารณาได้ว่าเป็นการลัดวงจรไฟฟ้กระแสสลับ เช่นเดียวกัน ดังนั้น ในแง่ของไฟฟ้กระแสสลับ ตัวต้านทาน  $R_C$  และ  $R_L$  จะเสมือนกับต่อขนานกันอยู่ เมื่อพิจารณาเช่นนี้แล้วจึงได้วงจรกระแสสลับดังรูปที่ 1.52 และเมื่อแปลงทรานซิสเตอร์เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายแล้ว จะได้รูปที่ 1.53

จากรูปที่ 1.53 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า  $v_i$  จะเท่ากับ

$$v_i = i_b \cdot h_{ie} \tag{1.25}$$



รูปที่ 1.52



รูปที่ 1.53

นอกจากนี้ เมื่อให้ความต้านทานรวมที่เกิดจากการขนานความต้านทาน  $R_C$  และ  $R_L$  เท่ากับ  $R'_L$  แล้ว

$$R'_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{2 \text{ [k}\Omega\text{]} \cdot 3 \text{ [k}\Omega\text{]}}{2 \text{ [k}\Omega\text{]} + 3 \text{ [k}\Omega\text{]}} = 1.2 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้น แรงดันขาออก  $v_o$  ที่เกิดจาก  $i_c = h_{fe} \cdot i_b$  จะเท่ากับ

$$v_o = i_c \cdot R'_L = h_{fe} \cdot i_b \cdot R'_L \tag{1.26}$$

สามารถคำนวณอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า  $A_v$  ได้ดังต่อไปนี้

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{h_{fe} \cdot i_b \cdot R'_L}{i_b \cdot h_{ie}} = \frac{h_{fe} \cdot R'_L}{h_{ie}} = \frac{200 \times 1.2 \times 10^3}{1.5 \times 10^3} = 160 \text{ เท่า}$$

Voltage gain มีนิยามดังต่อไปนี้ และมีหน่วยเป็น [dB]

$$G_v = 20 \cdot \log_{10} A_v = 20 \cdot \log_{10} 160 \approx 44.1 \text{ dB}$$

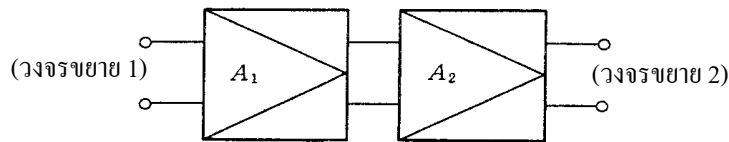
หมายเหตุ กรณีที่มีวงจรขยายต่อซ้อนกัน 2 ชั้นดังรูปที่ 1.54 ระดับการขยายรวม  $A_0 = A_1 \cdot A_2$  และเนื่องจาก

$$G_1 = 20 \cdot \log_{10} A_1, \quad G_2 = 20 \cdot \log_{10} A_2$$

ดังนั้น Gain รวมจึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} G_0 &= 20 \cdot \log_{10} A_1 \cdot A_2 = 20 \cdot \log_{10} A_1 + 20 \cdot \log_{10} A_2 \\ &= G_1 + G_2 \end{aligned}$$

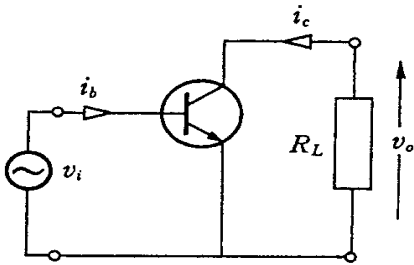
หรือเท่ากับผลบวกของ Gain ของแต่ละวงจรรวมกัน



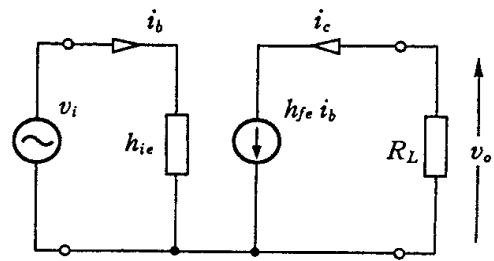
รูปที่ 1.54

ตัวอย่าง 1.15 รูปที่ 1.55 แสดงวงจร Common emitter ที่เขียนโดยย่อสำหรับกระแสสลับ เมื่อให้แรงดันขาเข้าเท่ากับ  $v_i$  [V] ให้แรงดันขาออกเท่ากับ  $v_o$  [V] จะมีอัตราขยายแรงดัน 200 เท่า ค่าความต้านทานของภาระไฟฟ้า  $R_L$  [kΩ] ของวงจรมีค่าเท่าใด ทั้งนี้ ให้ค่า h-parameter ของวงจรมีค่าเท่ากับ  $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$  และอัตราขยายกระแส  $h_{fe} = 100$

วิธีทำ: เมื่อแทนที่ทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรมมูลอย่างง่าย จะได้รูปที่ 1.56 และคำนวณหาแรงดันขาออกและขาเข้า  $v_i$  และ  $v_o$  ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.55



รูปที่ 1.56

$$v_i = i_b \cdot h_{ie}$$

ดังนั้น

$$i_b = \frac{v_i}{h_{ie}} \quad \dots\dots\dots(1.27)$$

$$v_o = i_c \cdot R_L = h_{fe} \cdot i_b \cdot R_L \quad \dots\dots\dots(1.28)$$

เมื่อนำสูตร (1.27) แทนค่าในสูตร (1.28) จะได้

$$\begin{aligned} v_o &= i_c \cdot R_L = h_{fe} \cdot R_L \cdot v_i / h_{ie} \\ \therefore R_L &= \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{h_{ie}}{h_{fe}} = 200 \times \frac{1 \times 10^3}{100} \\ &= 2 \times 10^3 \Omega = 2 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

### 1.1.6.3 วงจรกำเนิดสัญญาณ

วงจรงกำเนิดสัญญาณมีหลายชนิด เช่น กำเนิดคลื่นไซน์ กำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยม กำเนิดคลื่น Pulse เป็นต้น วงจรเหล่านี้ที่จริงแล้วเป็นการประยุกต์วงจรขยาย โดยนำสัญญาณขาออกส่วนหนึ่งของวงจขยายมาทำ Positive feedback กลับเข้ามาทางขาเข้า ดังรูปที่ 1.57

เมื่อให้อัตราขยายของวงจขยายและวงจ feedback เท่ากับ  $A (V_o/V_i)$  และ  $\beta (V_f/V_o)$  แล้วอัตราขยายรวม  $A_o$  ของทั้งบล็อกละเท่ากัน

$$A_o = V_o / V_i = A / (1 - A \cdot \beta)$$

และเมื่อ  $A \cdot \beta = 1$  จะได้  $A_o = \infty$  ภายใต้เงื่อนไขนี้วงจรจะสามารถกำเนิดกระแสสลับที่มีความถี่ค่าหนึ่งได้โดยไม่ต้องใช้สัญญาณขาเข้าจากภายนอก

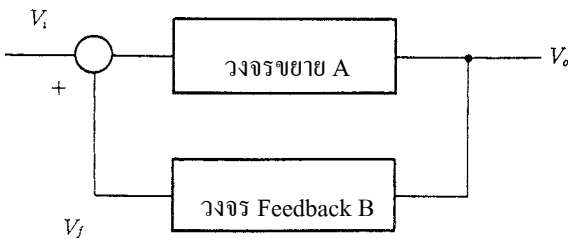
วงจรงกำเนิดสัญญาณมีหลายชนิด เช่น วงจร LC วงจร CR วงจรคริสตัล เป็นต้น รูปที่ 1.58-1.60 แสดงวงจรงกำเนิดสัญญาณ Hartley วงจรงกำเนิดสัญญาณ Colpitts และวงจรงกำเนิดสัญญาณ CR phase shift ตามลำดับ วงจรงกำเนิดสัญญาณคริสตัล จะมีโครงสร้างวงจรงรวมมัลกับวงจรงกำเนิดสัญญาณ LC

ความถี่ของสัญญาณในแต่ละวงจรงสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

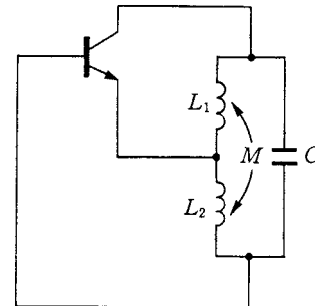
วงจรงกำเนิดสัญญาณ Hartley :  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$  [Hz]      ทั้งนี้  $L = L_1 + L_2 - 2M$  [H]

วงจรงกำเนิดสัญญาณ Colpitts :  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$  [Hz]      ทั้งนี้  $C = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$  [F]

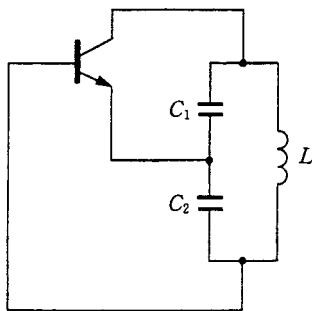
วงจรงกำเนิดสัญญาณ CR phase shift :  $f = 1/(2\pi\sqrt{6}CR)$  [Hz]



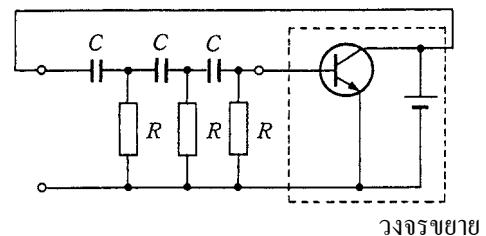
รูปที่ 1.57 Block diagram วงจรงกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 1.58 วงจรงกำเนิดสัญญาณ Hartley



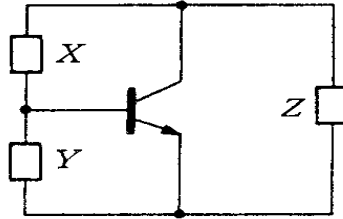
รูปที่ 1.59 วงจรงกำเนิดสัญญาณ Colpitts



รูปที่ 1.60 วงจรงกำเนิดสัญญาณ Phase shift

ตัวอย่าง 1.16 การที่วงจรในรูปที่ 1.61 จะทำงานเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณได้ X, Y, Z จะต้องเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทใด

- (ก) X :  $L_1$  Y :  $L_2$  Z : C
- (ข) X :  $L_1$  Y :  $C_1$  Z :  $L_2$
- (ค) X : C Y :  $L_2$  Z :  $L_1$
- (ง) X :  $C_1$  Y :  $C_2$  Z : L
- (จ) X :  $L_1$  Y :  $L_2$  Z :  $L_3$

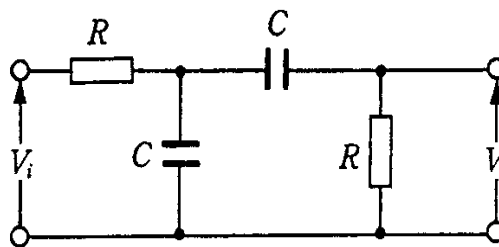


รูปที่ 1.61

ตอบ (ค)

คำอธิบาย วงจร (ค) เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ Hartley นั้นเอง

นอกจากนี้ หาก X, Y, Z เท่ากับ X : L Y :  $C_2$  Z :  $C_1$  วงจรนี้จะกลายเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ Colpitts



รูปที่ 1.62

ตัวอย่าง 1.17 รูป 1.62 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ CR พร้อมวงจร Phase shift สมการข้อใดต่อไปนี้อธิบายวงจรนี้ได้ถูกต้อง ทั้งนี้ ให้ Gain ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณเท่ากับ G และให้ความถี่ที่กำเนิดสัญญาณเท่ากับ f

- (1)  $f = 1/(2\pi\sqrt{RC})$ ,  $G > 29$
- (2)  $f = 1/(2\pi\sqrt{6CR})$ ,  $G > 29$
- (3)  $f = 1/(2\pi RC)$ ,  $G > 3$
- (4)  $f = 1/(2\pi RC)$ ,  $G > 29$
- (5)  $f = 1/(2\pi\sqrt{6CR})$ ,  $G > 3$

ตอบ (3)

เมื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้า  $V$  กระแสไฟฟ้า  $I_1$  และ  $I_2$  ตามรูปที่ 1.63 จะได้  $I_1$  เท่ากับ

$$I_1 = V_o / R \quad \dots\dots\dots(1.29)$$

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้า  $V$  จึงแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$V = \frac{I_1}{j\omega C} + V_o = \left(1 + \frac{1}{j\omega CR}\right) V_o \quad \dots\dots\dots (1.30)$$

และจากสูตร (1.29) สามารถคำนวณ  $I_2$  ได้ดังต่อไปนี้

$$I_2 = j\omega CV = j\omega C \left(1 + \frac{1}{j\omega CR}\right) V_o \quad \dots\dots\dots (1.31)$$

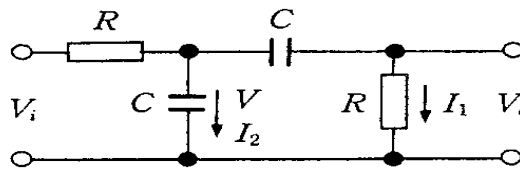
ดังนั้น  $V_i$  จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_i = R(I_1 + I_2) + V$$

จากสมการ (1.29) (1.30) และ (1.31) จะ

$$V_i = \left[3 + j\omega CR \left\{1 - \frac{1}{(\omega CR)^2}\right\}\right] V_o \quad \dots\dots\dots (1.32)$$

ดังนั้น  $\omega = 1/(CR)$  ( $\omega = 2\pi f$ ) และมีเฟสตรงกัน ตามเงื่อนไขนี้ เนื่องจากค่า  $V_o/V_i$  ในวงจร Phase shift จะเท่ากับ 1/3 ดังนั้น Gain ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณอย่างน้อยต้องมากกว่า 3 เท่า



รูปที่ 1.63

### 1.1.6.4 Op-amp

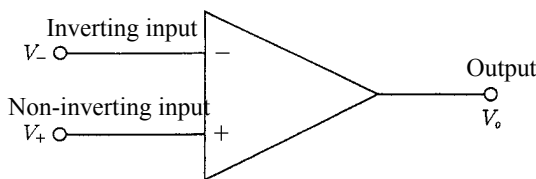
เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ใช้ในวงจรประมวลผล เช่น การบวกหรืออินทิเกรตสัญญาณ เป็น IC (วงจรรวม) ที่ประกอบด้วยวงจรขยายทรานซิสเตอร์ ตามรูปที่ 1.64 Op-amp มีสัญญาณขาเข้า 2 ขั้ว ได้แก่ Inverting input ซึ่งสัญญาณขาออกจะกลับเฟส 180° กับสัญญาณขาเข้า และ Non-inverting input ซึ่งสัญญาณขาออกจะมีเฟสตรงกับสัญญาณขาเข้า และมีสัญญาณขาออก 1 ขั้ว

รูปที่ 1.65 แสดงวงจรขยายแบบ Common mode โดยป้อนสัญญาณขาเข้าที่ขั้วสัญญาณขาเข้าตรงเฟส อัตราขยาย A แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

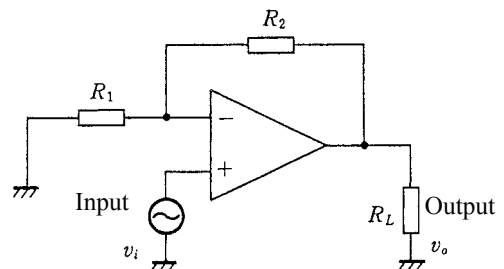
$$A = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

รูป 1.66

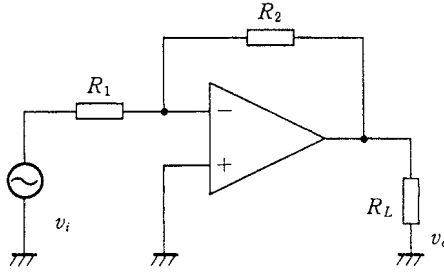
$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



รูปที่ 1.64 op-amp



รูปที่ 1.65 วงจรขยายแบบ Common mode



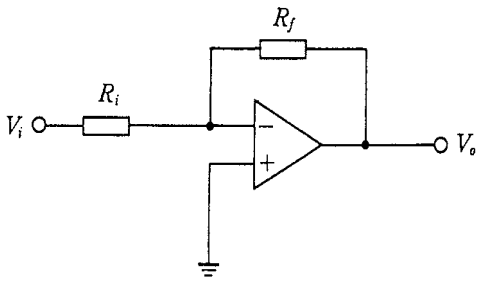
รูปที่ 1.66 วงจรขยายแบบ Common mode

ตัวอย่าง 1.18 ข้อความต่อไปนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับ Op-amp จงเลือกคำตอบหรือสูตรที่ถูกต้องจากตัวเลือกที่ให้มา เติมลงในวงเล็บ

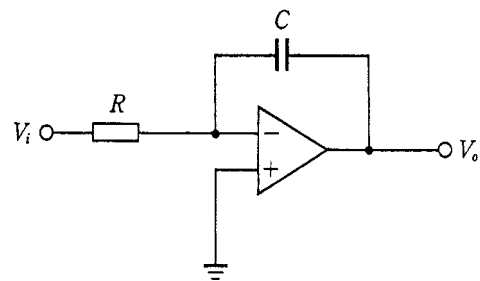
Op-amp ในอุดมคติจะถูกสมมติว่ามีคุณสมบัติพื้นฐานดังต่อไปนี้

1. มี (1) เป็นอินพุต
2. มีอินพุตแชนแนลขาเข้าเป็น (2)
3. มีอินพุตแชนแนลขาออกเป็นศูนย์
4. เมื่อแรงดันขาเข้า  $V_i = 0$  แล้วแรงดันขาออก  $V_o = 0$
5. มี Bandwidth สูงมาก

เมื่อใช้ Op-amp เช่นนี้ต่อวงจรตามรูปที่ 1.67 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ( $V_o/V_i$ ) จะเท่ากับ (3) และเมื่อต่อวงจรตาม รูปที่ 1.68 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_o$  และ  $V_i$  จะแสดงได้ตามสมการ (4) วงจรนี้ทำหน้าที่เป็น (5)



รูปที่ 1.67



รูปที่ 1.68

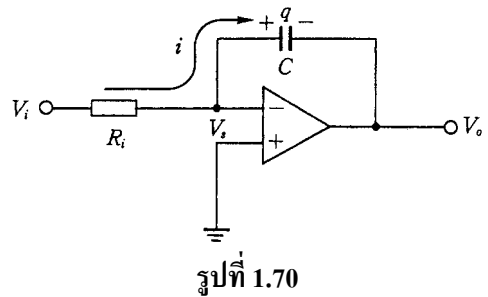
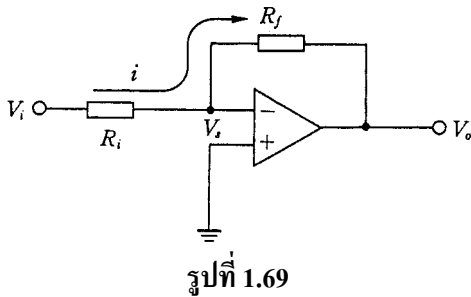
(ตัวเลือก)

- |  |                          |                                       |                                 |
|--|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| (ก) วงจร differential                          | (ข) $\frac{R_f}{R_i}$    | (ค) อินพุต                            | (ง) ขยายกระแสไฟฟ้า              |
| (จ) $-\frac{R_f}{R_i}$                         | (ฉ) อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า | (ช) $V_o = -\frac{C}{R} \int V_i dt$  | (ซ) $V_o = -RC \frac{dV_i}{dt}$ |
| (ฉ) $\frac{R_i}{R_f}$                          | (ญ) $-\frac{R_i}{R_f}$   | (ฎ) ศูนย์                             | (ฏ) อัตราขยายกำลังไฟฟ้า         |
| (ฐ) $V_o = -\frac{R}{C} \cdot \frac{dV_i}{dt}$ | (ฑ) วงจรอินทิเกรต        | (ฒ) $V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$ |                                 |

ตอบ (1)–(ฉ) (2)–(ค) (3)–(จ) (4)–(ฒ) (5)–(ฑ)

**คำอธิบาย** ข้อ (1) และ (2) คุณสมบัติของ Op-amp ในอุดมคติ คือมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเป็นอนันต์ มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นอนันต์ และมีอิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์ หากอัตราขยายเป็นอนันต์ (ในทางปฏิบัติคือสูงมาก) แล้ว เมื่อทำ Negative feedback จะสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรรขยายที่มีเสถียรภาพได้ และการที่อิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นอนันต์ หมายความว่าอุปกรณ์ขยายสัญญาณนี้จะทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น โดยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานจึงเท่ากับศูนย์ และการที่อิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์ หมายความว่าไม่ว่าจะนำไปขับ Load ใดๆ ก็สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ได้ กล่าวคือสามารถขับ Load ได้ไม่จำกัดนั่นเอง

ข้อ (3) ในรูปที่ 1.69 เนื่องจากอิมพีแดนซ์ขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณเท่ากับอนันต์ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าแรงดัน  $V_i$  ที่ไหลผ่าน  $R_i$  เข้ามายังอุปกรณ์ขยายสัญญาณจะไหลผ่าน  $R_f$  ทั้งหมด ในกรณีนี้เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วลบของ Op-amp เท่ากับ  $V_s$  แล้ว



$$\frac{V_i - V_s}{R_i} = \frac{V_s - V_o}{R_f}$$

$$\frac{V_i}{R_i} = \frac{V_o}{R_f} + \left( \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f} \right) V_s$$

นอกจากนี้ ถ้าให้อัตราขยายของ Op-amp เท่ากับ  $A$  แล้ว เนื่องจาก  $V_o = -AV_s$  ดังนั้น หากนำ  $V_s = -V_o/A$  เข้าไปแทนค่าในสูตรข้างต้น จะได้ว่า

$$\frac{V_i}{R_i} = - \left\{ \frac{1}{R_f} + \frac{1}{A} \left( \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f} \right) \right\} V_o$$

ในที่นี้ เนื่องจาก  $A$  เป็นอนันต์ (ในทางปฏิบัติคือสูงมาก)

$$\frac{1}{R_f} \gg \frac{1}{A} \left( \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f} \right)$$

ดังนั้น

$$\frac{V_i}{R_i} = - \frac{V_o}{R_f}$$

จากข้างต้น จะได้ว่า  $V_o / V_i = R_f / R_i$

ข้อ (4) และ (5) จากวงจรในรูป 1.70 เมื่อตั้งสมการเหมือนข้อ (3) แล้ว

$$\frac{V_i - V_s}{R} = i, \quad q = C(V_s - V_o)$$

ดังนั้น

$$\int \frac{V_i - V_s}{R} dt = q = C(V_s - V_o)$$

นอกจากนี้ เนื่องจาก  $V_s = -V_o/A$  และ  $A$  มีค่าสูงมาก ดังนั้น จะถือว่า  $V_s = 0$  ก็ได้ ดังนั้น

$$\int \frac{V_i}{R} dt = -CV_o$$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

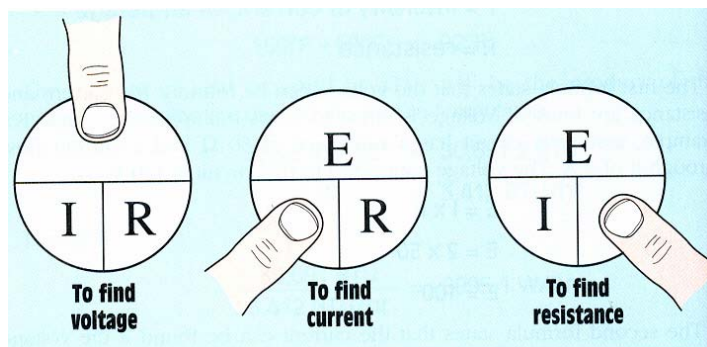
ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรรวมอินทิเกรต

วงจรรวมที่ต่อขั้วบวกของ Op-amp ลงกราวด์ และต่อขั้วลบกับ Input เช่น ในรูปที่ 1.69 และ 1.70 เรียกว่า Inverting amplifier circuit ในกรณีของวงจรรวมเช่นนี้  $V_s$  จะมีค่าเกือบเป็นศูนย์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงเปรียบได้กับขั้วลบต่อลงกราวด์อยู่ หากนำมาใช้เป็นเทคนิคในการคำนวณ ก็จะทำให้ง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่นในข้อ (4) เป็นต้น

### 1.1.7 หน่วยวัดทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส กำลัง และพลังงาน

จากกฎของโอห์มซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า คือ

1. แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt) สัญลักษณ์ V
2. กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) สัญลักษณ์ A
3. ความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) สัญลักษณ์  $\Omega$



รูปที่ 1.71 การหาค่าแรงดัน กระแส และความต้านทานจากกฎของโอห์ม

จากสามเหลี่ยมกล ถ้าเราต้องการหาค่าตัวใด ให้ปิดตัวที่ต้องการหา ก็จะได้ค่าของตัวที่เราต้องการทราบ เช่น ต้องการหา E (แรงดันไฟฟ้า) ปิด E ไว้ก็จะได้

$$E = I \cdot R \text{ (V) (I คูณ R มีหน่วยเป็น โวลต์ V)}$$

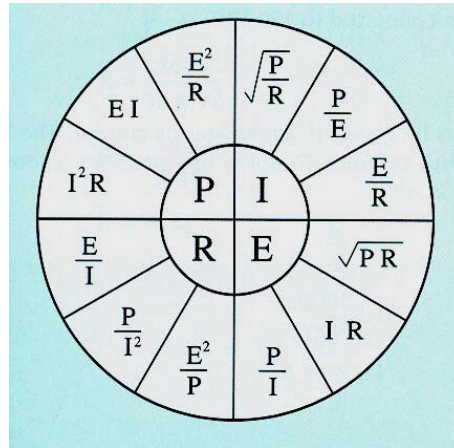
$$\text{หรือ } I = E / R \text{ (A) (E ส่วนหรือหารด้วย R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ A)}$$

$$\text{หรือ } R = E / I \text{ (\Omega) (E ส่วนหรือหารด้วย I มีหน่วยเป็นโอห์ม \Omega)}$$

โดยกฎของโอห์มได้กล่าวถึงค่าความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า นี้ไว้ว่า

1. แรงดันไฟฟ้าขนาดหนึ่ง โวลต์ หมายถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถดันกระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ให้ ไหลผ่านความต้านทานหนึ่งโอห์มไปได้
2. กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ หมายถึงค่าของกระแสไฟฟ้าสามารถดันให้ผ่านความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มไปได้
3. ความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มหมายถึงค่าความต้านทานที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ที่ถูกรวมแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าหนึ่ง โวลต์ดันให้ผ่านไปได้

การหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน ความต้านทาน และกำลังทางไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน การคำนวณเพื่อหาค่าจะต้องทราบค่าอย่างน้อย 2 ค่าจึงจะหาค่าที่ต้องการได้ ตัวอย่างเช่น ต้องการทราบค่าความต้านทาน จะต้องทราบค่าแรงดันและกระแส หรือต้องการทราบค่ากำลังทางไฟฟ้าจะต้องทราบค่าของแรงดันและกระแสเป็นต้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปเป็นสูตรเพื่อใช้ในการหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 1.72 สูตรที่ใช้ในการหาค่าแรงดัน กระแส ความต้านทานและกำลังไฟฟ้า

### 1.1.7.1 กำลังไฟฟ้า (Electric Power)

กำลังไฟฟ้า หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ไปในการทำให้เกิดเป็นพลังงานรูปต่างๆ เช่น พลังงานแสงสว่าง พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น ในระยะเวลาที่กำหนด โดยกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt:W) โดยที่จะมีสูตรในการคำนวณ กำลังไฟฟ้างดังนี้

$$\text{สูตรที่ 1 } P = E \cdot I \quad (\text{Watt})$$

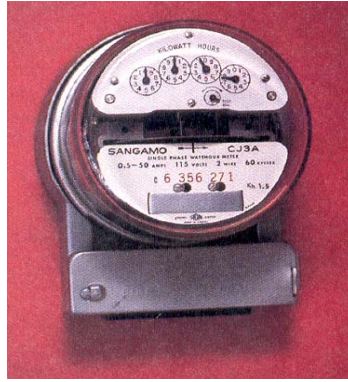
$$\text{สูตรที่ 2 } P = I^2 \cdot R \quad (\text{Watt})$$

$$\text{สูตรที่ 3 } P = E^2 / R \quad (\text{Watt})$$

### 1.1.7.2 พลังงานไฟฟ้า (Electric Energy)

หน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้าน จะมีหน่วยเป็น “กิโลวัตต์-ชั่วโมง” (kilo Watt hour) หรือที่เรียกกันว่า “ยูนิต” (Unit) ค่าของพลังงานไฟฟ้าจะได้มาจากผลคูณของกำลังไฟฟ้า (Electric Power) ของเครื่องใช้ไฟฟ้ากับจำนวนระยะเวลาที่ใช้ เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นๆ โดยที่หน่วยของระยะเวลาที่ใช้จะมีหน่วยเป็น “ชั่วโมง” (Hour) ดังนั้นอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ 1 ยูนิต จะเท่ากับการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ในระยะเวลาทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	=	กำลังไฟฟ้า (kW) x เวลา (h)
W	=	P x t
เมื่อ W	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีหน่วยเป็นวัตต์วินาที (W-s) หรือกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)
P	=	กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
t	=	เวลามีหน่วยเป็นวินาที (s) หรือชั่วโมง (h)



รูปที่ 1.73 แสดงเครื่องมือวัดกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

## 1.1.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

### 1.1.8.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน คือ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นมา ค่าความต้านทานจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขบวนการผลิตตัวความต้านทาน หน้าที่ของตัวความต้านทานที่ประกอบรวมในวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการป้อนเข้าไปเลี้ยงวงจร ถือได้ว่าตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการใช้งานวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มาก

ตัวต้านทานแล้ว แบ่งประเภทได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- ก. แบ่งตามวัสดุที่ใช้สร้างตัวต้านทาน
- ข. แบ่งตามชนิดการใช้งานของตัวต้านทาน

วัสดุที่นำมาผลิตเป็นตัวต้านทาน ถูกนำมาจากวัสดุ 2 ประเภท คือ วัสดุประเภทโลหะ (Metallic Type) และวัสดุประเภทอโลหะ (Non - Metallic Type)

#### (1) ตัวต้านทานประเภทโลหะ

โลหะที่นำมาผลิตเป็นตัวต้านทาน ถูกสร้างขึ้นในรูปเส้นลวด (Wire) หรือแถบลวด (Ribbon) ประเภทนิโครม (Nichrome) ฟันบนแกนเซรามิก และต่อปลายลวดเข้ากับขาโลหะไว้ต่อใช้งาน ผิวต้านนอกเคลือบด้วยฉนวนอีกชั้นหนึ่ง สร้างออกมาแบบตัวความต้านทานคงที่ และแบบปรับค่าได้สร้างตัวต้านทานประเภทนี้มักถูกเรียกว่าตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Wound Resistor)

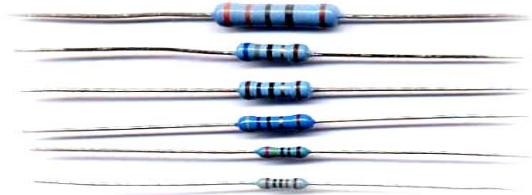
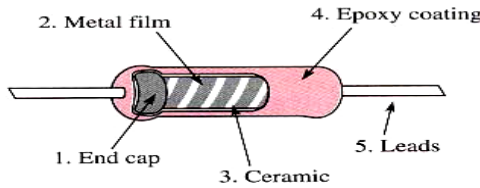
ข้อดีของตัวต้านทานประเภทนี้ คือ สามารถสร้างให้มีค่าทนกำลังไฟฟ้า (วัตต์) ได้สูงถึงเป็นร้อยๆ วัตต์ ค่าความต้านทาน มีความคงที่ต่ออุณหภูมิ มีความคลาดเคลื่อนน้อย



รูปที่ 1.74 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ประเภททนกำลังวัตต์สูง

ผลิตตัวต้านทานอีกชนิดหนึ่ง คือ ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) เป็นตัวต้านทานที่นิยมใช้กัน เพราะมีค่าความผิดพลาดต่ำกว่า 1% จนถึง 0.1% โครงสร้างของตัวต้านทานประเภทนี้ประกอบด้วยแกนกลมเล็กๆ ที่ทำจากเซรามิก เคลือบด้วยโลหะออกไซด์บนผิวของแกนเซรามิก โดยการเคลือบในสุญญากาศ โลหะที่ใช้เคลือบเป็นพวกโครเมียมหรือนิกเกิล การเคลือบบนแกนเซรามิกจะเป็นแบบพันรอบแกนเซรามิกแบบต่อเนื่องจากปลายข้างหนึ่ง ไปยังปลายอีกข้างหนึ่ง

ข้อดีของความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ คือ มีความต้านทานที่ผิดพลาดต่ำมาก เพราะใช้แสงเลเซอร์จะตัดเอาโลหะส่วนเกินออก แต่มีราคาแพง



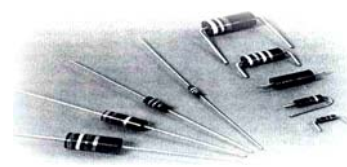
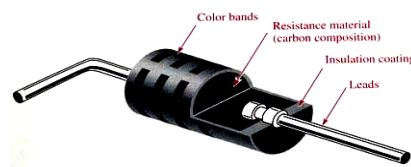
รูปที่ 1.75 แสดงตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ

### (2) ตัวต้านทานประเภทโลหะ

โลหะที่นำมาใช้ผลิตตัวต้านทานมีด้วยกันหลายชนิด ตัวต้านทานประเภทนี้ ได้แก่ แบบคาร์บอน (Carbon) แบบคาร์บอนฟิล์ม (Carbon Film) และแบบฟิล์มบาง (Thin Film)

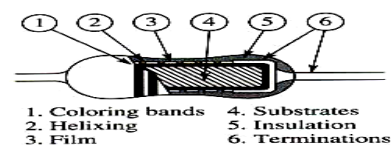
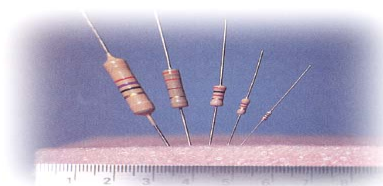
1) ตัวต้านทานแบบคาร์บอน ผลิตโดยการใช้ผงคาร์บอน หรือ ผงกราไฟต์ มาอัดรวมกับสารซิลิกาและกาว แล้วอัดแน่นเป็นแท่งทรงกลม มีขาตัวนำต่อเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้าง และนำไปจุ่มในสารอีพ็อกซี หรือหุ้มด้วยฉนวน ตัวต้านทานตัวเล็กจะมีค่าทนกำลังไฟฟ้าต่ำ ตัวใหญ่จะมีค่าทนกำลังไฟฟ้าสูง

ข้อเสียของตัวต้านทานแบบคาร์บอน คือ มีความผิดพลาดสูง และไม่สามารถนำไปใช้งานกับความถี่สูงได้ เพราะจะเกิดสัญญาณรบกวน อุณหภูมิก็มีผลกับความต้านทานแบบนี้



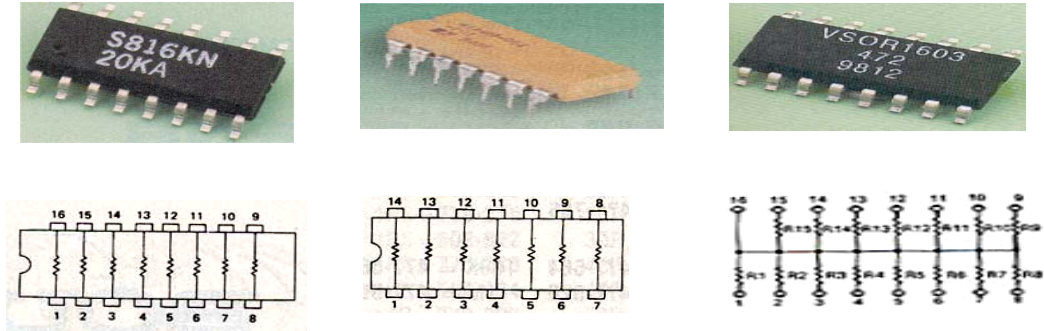
รูปที่ 1.76 แสดงตัวต้านทานแบบคาร์บอน

2) ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน ผลิตโดยใช้ผงคาร์บอนผสมกับผงซิลิกาเคลือบหุ้มแกนเซรามิกแบบกลมชนิดเล็ก เชื่อมต่อขาตัวต้านทานทั้งสองข้างและหุ้มฉนวนปิดทับอีกชั้น คุณสมบัติของตัวต้านทานแบบนี้คล้ายกับแบบคาร์บอน



รูปที่ 1.91 แสดงตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

3) ตัวต้านทานแบบฟิล์มบาง มีลักษณะการผลิตคล้ายกับแบบฟิล์มคาร์บอน ใช้เทคโนโลยีเข้าช่วยสร้างขึ้นได้หลายตัวในโครงสร้างเดียวกัน ต่อเชื่อมขาออกมาภายนอกในรูปของไอซี อาจเป็นแบบตัวตะขาบ หรือแบบตั้ง นิยมนำไปใช้งานในเครื่องมือเครื่องใช้สมัยใหม่ เช่น คอมพิวเตอร์ ดาวเทียม เครื่องบิน ฯลฯ

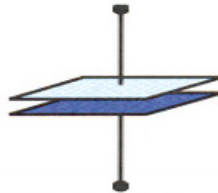


รูปที่ 1.70 แสดงรูปร่างและสัญลักษณ์ตัวต้านทานแบบฟิล์มบาง

### 1.1.8.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ(Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ(Charge) และสามารถคายประจุ(Discharge)ได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่นวงจรกรองกระแส ( Filter ) วงจรผ่านสัญญาณ ( By-pass ) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) ฯลฯ เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบค่าคงที่ แบบเปลี่ยนแปลงค่าได้และแบบเลือกค่าได้ ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวซี ( C ) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad)

ตัวเก็บประจุ(Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้โดยนำสารตัวนำ 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกันระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กตริกนี้อาจจะเป็นอากาศ ไมก้า พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่น ๆ เป็นต้น โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 1.79



รูปที่1.79 แสดงรูปร่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

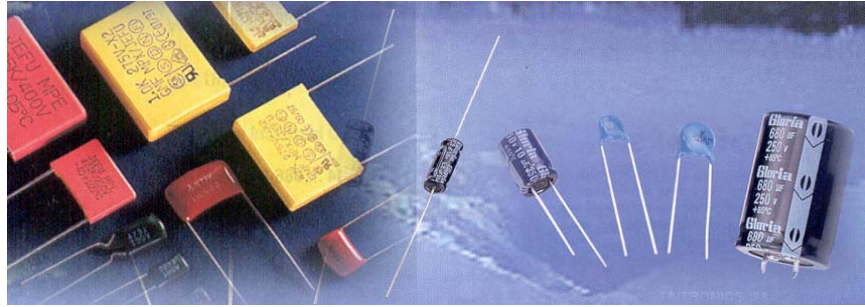
#### (1) ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor)
2. ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)
3. ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor)

ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่(Fixed Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลม หรือเป็นทรงกระบอก ซึ่งมักแสดงค่าที่ตัวเก็บประจุ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด ( $\mu$ F)

การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้ จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดไดอิเล็กโตรไลติก ชนิดเซรามิก ชนิดไมก้า เป็นต้น



รูปที่ 1.80 แสดงตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้(Variable Capacitor) ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ไดอิเล็กตริกที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 1.81 แสดงตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้(Selected Capacitor) คือตัวเก็บประจุในตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่า ดังแสดงในรูปที่ 1.96



รูปที่ 1.82 แสดงรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้

## (2) หน่วยความจุ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุหมายถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ฟารัด(Farad) เขียนแทนด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวเอฟ (F) ตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ 1 ฟารัด หมายถึง เมื่อป้อนแรงเคลื่อนจำนวน 1 โวลต์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ในเวลา 1 วินาที ให้กับแผ่นเพลททั้งสอง สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 คูลอมบ์

1 ฟารัด(F)	เท่ากับ	1,000,000	ไมโครฟารัด(μF)
1 ไมโครฟารัด(μF)	เท่ากับ	1,000	นาโนฟารัด(nF)
1 นาโนฟารัด(nF)	เท่ากับ	1,000	พิโกฟารัด(pF)

จากความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าและแรงดัน สามารถเขียนเป็นสูตรความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$C = \frac{Q}{V}$$

เมื่อ	C	=	ค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	Q	=	ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์(C)
	V	=	แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

### 1.1.8.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำหรืออินดักเตอร์ (Inductor) เป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งที่มีบทบาทในการทำงานและการใช้งานทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเหนี่ยวนำสร้างขึ้นมาจากเส้นลวดตัวนำพันขึ้นมาเป็นขดลวด หรือ คอยล์ (Coil) หรือชุดของขดลวด การทำงานและการใช้งานของตัวเหนี่ยวนำจะเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก เมื่อตัวเหนี่ยวนำถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้ตัวเหนี่ยวนำนั้นเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นทันที ถ้างดจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้ตัวเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเกิดการยุบตัวตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำอีกครั้งจะได้ แรงดันไฟฟ้าออกมาจากตัวเหนี่ยวนำ ประโยชน์ดังกล่าวนี้เองทำให้ตัวเหนี่ยวนำถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง

#### (1) ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

ชนิดของตัวเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

1) ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาว แบบทรงกระบอกมีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น โซลินอยด์ เซอร์เฟสเมาท์ ไซค์ ทอร์รอยด์ และแบบแถบสี่ ฯลฯ เป็นต้น



รูปที่ 1.83 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่

2) ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุ ค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุนที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออกเพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาจนสุดค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมากจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติกหรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็ก และมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำได้



รูปที่ 1.84 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้

(2) หน่วยของค่าความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry) โดยใช้ตัวย่อ “H” หน่วยเฮนรี โดยค่าความเหนี่ยวนำ 1 เฮนรี คือ ค่าที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในขดลวดตัวนำเปลี่ยนแปลง 1 แอมแปร์ ต่อ 1 วินาที ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (Counter Electro Motive Force) 1 โวลต์

**1.2 พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า เช่น การวัดแรงดันไฟฟ้า การวัดกระแสไฟฟ้า การวัดกำลังไฟฟ้า การวัดพลังงานไฟฟ้า (Basic electric measurement i.e., voltage, Current, power, electricity)**

**1.2.1 พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า**

**1.2.1.1 การวัด**

การอ่านค่าปริมาณที่วัดโดยตรงจากเครื่องวัด เรียกว่า การวัดโดยตรง การวัดปริมาณอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนอย่างหนึ่งกับปริมาณที่ต้องการวัด และใช้ค่าที่วัดได้นั้นมาคำนวณหาปริมาณที่ต้องการวัดทางอ้อม เช่น การแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทาน เรียกว่า การวัดทางอ้อม

การวัดปริมาณทางไฟฟ้าส่วนมากจะใช้วิธีแปลงปริมาณที่ต้องการวัดให้เป็นการกวาดของเข็มหน้าปัดเครื่องวัด วิธีนี้เรียกว่า Deflection method กรณีที่ต้องการวัดด้วยความเที่ยงตรงสูง จะใช้วิธีการปรับปริมาณที่ต้องการวัดให้สมดุลกับปริมาณมาตรฐาน แล้วหาค่าปริมาณที่ต้องการวัด โดยดูจากขนาดของปริมาณมาตรฐาน เช่น Potentiometer หรือการวัดบริดจ์ เป็นต้น วิธีนี้เรียกว่า Zero method ในการวัดความถี่และอัตราขยาย จะใช้วิธีลบค่าหนึ่งออกจากปริมาณที่ต้องการวัด แล้ววัดค่าที่เหลืออยู่ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าที่ต้องการวัดต่อไป วิธีนี้เรียกว่า Compensation method

กรณีของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีวิธีพิจารณาค่าที่วัดได้แตกต่างกันดังต่อไปนี้

- ค่า Effective: เป็นรากที่สองของค่าเฉลี่ยต่อ 1 คาบของกำลังสองของค่าในขณะใดๆ
- ค่าเฉลี่ย: เป็นค่าเฉลี่ยต่อ 1/2 คาบของค่าในขณะใดๆ

- ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง: เป็นค่าเฉลี่ยต่อ 1 คาบของกำลังสองของค่าในขณะใดๆ
- ค่า Peak-to-peak: เป็นผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าในขณะใดๆ

ค่า Effective มีความหมายคือ เทียบเท่ากับกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเท่ากัน เมื่อกระแสไฟฟ้าตัวต้านทาน  $1 \Omega$  ส่วนค่าเฉลี่ยของกำลังสอง เป็นความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อให้กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าแก่กระแสไฟฟ้าตัวต้านทาน  $1 \Omega$  ตัวอย่างเช่น เมื่อแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง ค่า Effective และค่า Peak-to-peak ของกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ที่มีค่า  $i = I \sin \omega t$  แล้ว

$$\text{ค่าเฉลี่ย } I_m = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (I \sin \omega t) dt = \frac{2I}{T} \left[ -\frac{1}{\omega} \cos \omega t \right]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2I}{\pi}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง } I_{ms} = \frac{1}{T} \int_0^T (I \sin \omega t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I^2}{2}$$

$$\text{ค่า effective } I_{rms} = \sqrt{I_{ms}} = I/\sqrt{2}$$

$$\text{ค่า peak-to-peak } I_{pp} = i_{\max} - i_{\min} = I - (-I) = 2I$$

ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าก็เหมือนกันทุกประการ โดยแทนค่าในขณะใดๆ  $i$  เป็น  $v$  และแทนค่าสูงสุด  $I$  ด้วย  $V$  เท่านั้น

### 1.2.1.2 หน่วยทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

กระแสไฟฟ้าเป็นหน่วยพื้นฐานตามระบบหน่วยวัดนานาชาติ (หน่วย SI) และหน่วยทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติอื่นๆ ก็เป็นหน่วยผสมของหน่วย SI ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

- กระแสไฟฟ้า 1 A: เท่ากับกระแสไฟฟ้าที่เมื่อกระแสไฟฟ้านี้ไหลผ่านลวดตัวนำตรง 2 เส้นที่มีความยาวเป็นอนันต์ มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมที่มีขนาดเล็กเป็นอนันต์ วางขนานกัน โดยมีระยะห่าง 1 m ในสุญญากาศแล้ว จะทำให้มีแรงกระทำต่อลวดแต่ละเส้นเท่ากับ  $2 \times 10^{-7}$  N ต่อความยาวของลวดตัวนำ 1 m กรณีที่เป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ค่า effective ของกระแสไฟฟ้านั้นต้องเท่ากับค่าที่นิยามไว้
- กำลังไฟฟ้า 1 W: เท่ากับกำลังที่ให้พลังงาน 1 J ต่อหนึ่งวินาที
- แรงดันไฟฟ้า 1 V: เท่ากับแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าลงที่ 1 A ไหลผ่านจุดทั้งสองแล้ว จะทำให้มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 W กรณีที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่า Effective ของแรงดันไฟฟ้านั้นต้องเท่ากับค่าที่นิยามไว้
- ความต้านทานไฟฟ้า 1  $\Omega$ : เท่ากับค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้า 1 A ไหลผ่านแล้ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างทั้ง 2 จุดนั้นจะเท่ากับ 1 V
- ประจุไฟฟ้า 1 C: เท่ากับปริมาณไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1 A พาให้เคลื่อนที่ไปในเวลา 1 วินาที
- ความจุไฟฟ้าสถิต 1 F: เท่ากับค่าความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์ที่มีเมื่อ charge คาปาซิเตอร์นั้นด้วยประจุไฟฟ้า 1 C แล้ว จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า 1 V
- อินดักแตนซ์ 1 H: เท่ากับอินดักแตนซ์ของวงจรปิดที่มีกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตรา 1 A/s ไหลผ่านแล้ว จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น 1 V
- เส้นแรงแม่เหล็ก 1 Wb: เท่ากับค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับวงจรปิดพัน 1 รอบ ลดลงอย่างสม่ำเสมอจนกลายเป็นศูนย์ในเวลา 1 วินาทีแล้ว จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น 1 V ในวงจรปิดนั้น

### 1.2.1.3 มาตรฐานทางไฟฟ้า

การวัด Fundamental standard มีการสร้างเครื่องมาตรฐานทางไฟฟ้าขึ้นมาหลายชนิด เพื่อรักษา Fundamental standard ให้คงที่ เครื่องมาตรฐานเหล่านั้นจะใช้ในการสอบเทียบเครื่องวัดทางไฟฟ้า ตัวอย่างของเครื่องมาตรฐานทางไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่แคดเมียมมาตรฐาน ซีเนอร์ไดโอด เป็นต้น โดยมากตัวต้านทานมาตรฐานจะทำจากตัวต้านทานแบบขดลวดที่ทำจาก Manganin (โลหะผสมระหว่าง Cu-Mn-Ni) รีแอกแตนซ์มาตรฐานจะใช้คาปาซิเตอร์แบบ Fused quartz หรือคาปาซิเตอร์แบบอากาศ หรือใช้ลวดทองแดงพันรอบฉนวนไฟฟ้า เช่น หินอ่อน ฯลฯ เพื่อกำเนิดอินดักแตนซ์ที่มีค่าคงที่ในช่วงความถี่ใช้งาน ส่วนมาตรฐานสำหรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะใช้วิธีเปรียบเทียบและสอบเทียบค่า Effective กับมาตรฐานกระแสตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเรียกว่า AC/DC converter หรือ AC/DC comparator มีทั้งแบบ Electrodynamometer, แบบไฟฟ้าสถิต และแบบ Thermoelectric ซึ่งมีความเที่ยงตรง สูงที่สุด

### 1.2.1.4 ความคลาดเคลื่อนในการวัด

ค่าที่วัดได้แม้จะมีความสัมพันธ์กับค่าจริงที่เครื่องวัดชี้บอก แต่เราไม่สามารถวัดค่าจริงได้ จะต้องทำการวัดหลายๆ ครั้งแล้วถือเอาค่าเฉลี่ยเป็นค่าจริง ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง เรียกว่า ความคลาดเคลื่อน อัตราส่วนระหว่างความคลาดเคลื่อนต่อค่าจริง เรียกว่า อัตราความคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดของผู้วัด ความคลาดเคลื่อนของระบบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด การเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อมและวิธีการวัด รวมทั้งความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญซึ่งไม่ทราบสาเหตุแน่ชัด ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนของระบบนั้น หากมีการค้นหาสาเหตุและดำเนินการแก้ไข ก็สามารถลดความคลาดเคลื่อนได้ และค่าที่วัดได้  $x$  ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญรวมอยู่ด้วยนั้น เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้งจะได้ค่าที่แตกต่างกัน แต่ระดับความไม่สม่ำเสมอ  $f(x)$  จะมีการกระจายเป็น Normal distribution ซึ่งแสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x-x_m}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (1.33)$$

$x_m$  เป็นค่าเฉลี่ยของการวัด  $\sigma$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งแสดงความไม่สม่ำเสมอของการวัด ถ้าให้การวัด  $n$  ครั้งได้ค่าเท่ากับ  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  แล้ว ค่าเฉลี่ยจะเท่ากับ

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (1.34)$$

ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หมายถึงค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$\sigma = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1.35)$$

เมื่อเราพูดถึงการวัดที่มีความเที่ยงตรงสูง ความเที่ยงตรงในที่นี้หมายถึงความถูกต้องและสามารถทำซ้ำได้ ความถูกต้องของการวัด หมายถึง ขนาดของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง ความสามารถในการทำซ้ำได้ หมายถึง ค่าอัตราส่วนของความไม่สม่ำเสมอของค่าที่วัดได้ที่แสดงเป็น % ซึ่งมี ความหมายเหมือนกับ ความเที่ยงตรง

สมรรถนะของเครื่องวัด ระบุได้ด้วย ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด (ค่าที่เครื่องวัด ชี้ออก – ค่า Input มาตรฐาน) ความไว (การเปลี่ยนแปลง Output / การเปลี่ยนแปลง Input) และความละเอียด (ขนาดของ Input ที่ทำให้ Output เปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้) กรณีที่พูดถึงความเที่ยงตรงของเครื่องวัด ความเที่ยงตรงในที่นี้จะหมายถึงความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดที่แสดงค่าเป็น %

### 1.2.1.5 ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เราต้องเลือกใช้เครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงไม่น้อยกว่าความเที่ยงตรงที่เราต้องการในการวัด ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแบ่งออกเป็น 5 ระดับตามความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดที่แสดงค่าเป็น % และถือเป็นความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ตารางที่ 1.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็นค่าร้อยละเทียบกับค่าพิกัด (Rated value) (ค่า Input มาตรฐาน) ดังนั้น เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อยที่สุด เราจึงต้องพยายามเลือกช่วงการวัดให้ใกล้กับค่าพิกัดมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ กล่าวคือ ต้องใช้ส่วนที่ค่าของขีดวัด (Scale) มีค่าสูง

กรณีที่ใช้เครื่องวัดที่มีเข็มชี้ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานไฟฟ้า  $r$  ของขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าคงที่ต่ออุณหภูมิเป็นบวก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ต้องมีวิธีชดเชยความคลาดเคลื่อนนี้ หลักการของการชดเชยอุณหภูมิก็คือ นำตัวต้านทาน  $R_c$  ซึ่งเป็นลวดความต้านทาน Manganin ที่มีค่าคงที่ของความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำมากและมีความต้านทานไฟฟ้าสูง มาต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ เมื่อทำเช่นนี้ ค่าคงที่ต่ออุณหภูมิของความต้านทานรวม  $r + R_c$  จะมีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ต่ออุณหภูมิของความต้านทานของขดลวดเคลื่อนที่มาก จึงสามารถลดอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ นอกจากนี้ ยังมีวิธีใช้เทอร์มิสเตอร์ซึ่งมีค่าคงที่ของอุณหภูมิเป็นลบ เพื่อมาหักล้างกับค่าคงที่ของอุณหภูมิของขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งเป็นบวกอีกด้วย

ตารางที่ 1.4 ระดับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ระดับความเที่ยงตรงของเครื่องวัด	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ต่อค่าพิกัด [%]	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
ระดับ 0.2	±0.2	เครื่องมาตรฐานรอง: เครื่องมาตรฐานสำหรับสอบเทียบ การวัดละเอียดมาก
ระดับ 0.5	±0.5	การวัดละเอียด: การวัดทั่วไปที่ต้องการความละเอียด
ระดับ 1.0	±1.0	การวัดปกติ: การวัดง่ายๆ เช่น เครื่องวัดพกติดตัว ฯลฯ
ระดับ 1.5	±1.5	เครื่องวัดอุตสาหกรรม: เครื่องวัดสำหรับแผงจ่ายไฟทั่วไปและแผงควบคุม
ระดับ 2.5	±2.5	เครื่องวัดคร่าวๆ: ใช้กับงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรง

## 1.2.2 เครื่องวัด

### 1.2.2.1 เครื่องวัดอนาล็อก

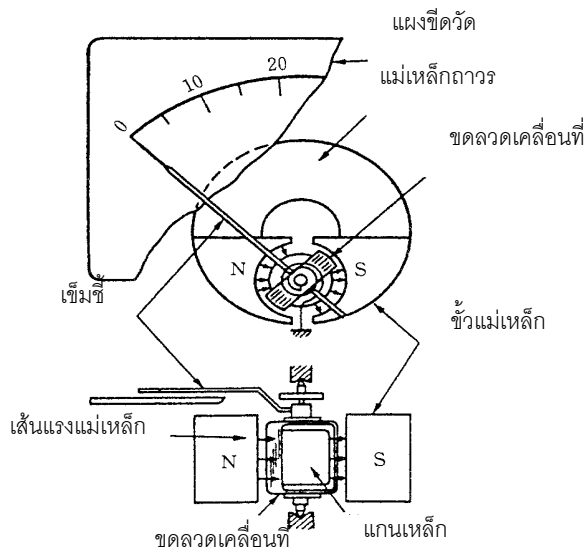
#### (1) เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil)

เป้าหมายในการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีช่วงการวัดตั้งแต่ไม่กี่  $\mu\text{A}$ –100 A , 10 mV–1 kV หลักการทำงานคือใช้ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

รูปที่ 1.85 แสดงขดลวดเคลื่อนที่พร้อมเข็มชี้ติดตั้งอยู่กลางสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอของแม่เหล็กถาวร เมื่อมีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่ จะเกิดแรงบิดขับเคลื่อน ทำให้คอยล์หมุน แต่เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่จะติดตั้งอยู่กับสปริงกันหอย เมื่อคอยล์หมุนไปจะเกิดแรงบิดต้าน คอยล์จะหมุนไปจะหยุดที่ตำแหน่งที่แรงบิดทั้งสองนี้สมดุลกัน มุมที่หมุนไปจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า ค่า K เรียกว่าค่าคงที่ของความไว ยังมีค่าสูงเครื่องวัดจะยังมีความไวสูง

หากนำตัวต้านทานที่มีความต้านทานสูงมาต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่จะแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าของวงจร จึงกลายเป็น Voltmeter

เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่สามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ไม่กี่สิบลีบ mA เท่านั้น ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง เราจึงต้องต่อ Shunt ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ และในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูง ต้องต่อ Multiplier อนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ เมื่อทำเช่นนี้แล้วจะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ถึงหลายพัน A หรือวัดแรงดันไฟฟ้าได้หลายสิบลีบ kV



รูปที่ 1.85 เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่

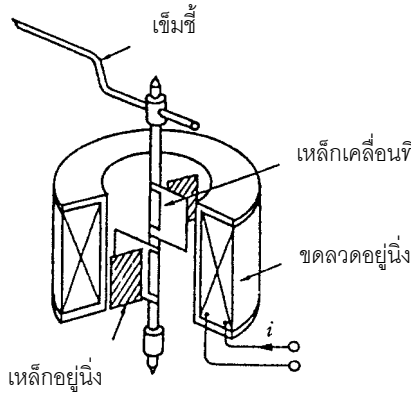
#### (2) เครื่องวัดแบบเหล็กเคลื่อนที่ (Moving iron)

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 500 Hz มีช่วงการวัดระหว่าง 10 mA–100 A, 10 V–10 kV หลักการทำงานคือใช้แรงดึงดูด-แรงผลักระหว่างเหล็กที่ถูกทำให้กลายเป็นแม่เหล็ก

การทำงานจะปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดให้ไหลผ่านขดลวดอยู่นิ่ง แล้วใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาทำให้เหล็กเคลื่อนที่กับเหล็กอยู่นิ่งกลายเป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะผลักหรือดูดเหล็กเคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งเข็มชี้เอาไว้ เนื่องจากเหล็กทั้งสองชิ้นจะกลายเป็นแม่เหล็กโดยมีขั้ว N และ S ชี้ไปทางเดียวกัน หากวางเหล็กเคลื่อนที่กับเหล็กอยู่นิ่งไว้ที่ความสูงเท่ากัน จะเรียกว่าเครื่องวัดแบบผลัก หากวางตำแหน่งให้มีความสูงเหลื่อมกัน จะเรียกว่าเครื่องวัดแบบดูด รูปที่ 1.86 แสดงโครงสร้างของเครื่องวัดแบบผลัก-ดูดซึ่งใช้ทั้งสองวิธีผสมกัน เนื่องจากระดับความเป็นแม่เหล็กจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า และแรงผลัก-แรงดูดจะแปรผันตามผลคูณของระดับความเป็นแม่เหล็กของเหล็กทั้งสองชิ้น ดังนั้น แรงบิด  $\tau$  ที่ทำให้เข็มเคลื่อนที่ซึ่งแปรผันตามค่าเฉลี่ยตามเวลาของกำลังของของค่ากระแสไฟฟ้าในขณะใดๆ  $i(t)$  ที่ไหลผ่านขดลวดอยู่นิ่ง

$$\tau = k \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad \dots\dots\dots(1.36)$$

ดังนั้นสำหรับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดแรงบิดที่มีขนาดแปรผันตามกำลังสองของค่า Effective เครื่องวัดประเภทนี้ใช้เป็น Voltmeter และ Ammeter สำหรับชี้บอกค่า Effective ของไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ประมาณไฟบ้านไปจนถึงหลายร้อย Hz



รูปที่ 1.86 เครื่องวัดแบบเหล็กเคลื่อนที่

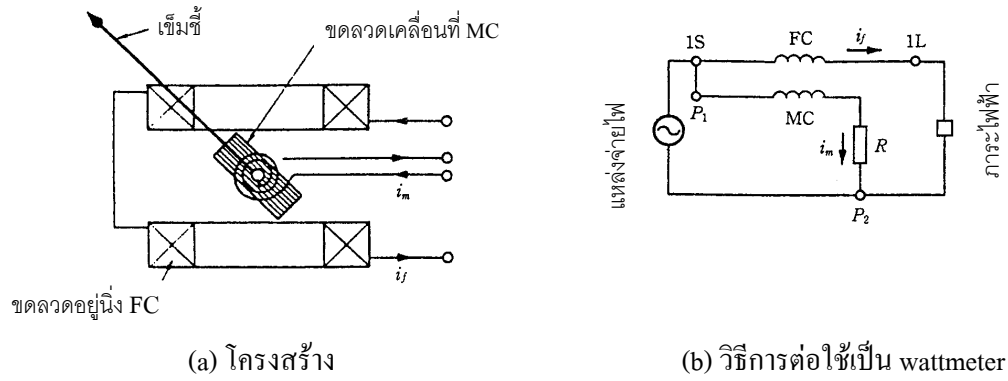
(3) เครื่องวัดแบบ Electrodynamometer

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 1 kHz มีช่วงการวัดระหว่าง 10 mA–20 A, 1 V–1 kV หลักการทำงานใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด 2 ชุด

รูปที่ 1.87 (a) แสดงโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยขดลวดอยู่นิ่ง (FC) ขดลวดเคลื่อนที่ (MC) โดยจะเกิดแรงบิดที่แปรผันตามผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทั้งสอง เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเดียวกันให้ไหลผ่านขดลวดทั้งสอง เข็มจะชี้บอกค่าที่แปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า รูปที่ 1.87 (b) แสดงวิธีการต่อวงจรเพื่อใช้เป็น Wattmeter โดยเมื่อให้กระแสไฟฟ้า  $i_f = I_f \sin(\omega t - \phi)$  ให้ไหลผ่าน FC และป้อนแรงดันไฟฟ้า  $v_m = V_m \sin \omega t$  ให้แก่ MC แล้ว  $v_m$  จะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า  $i_m$  ที่ไหลระหว่างขั้ว  $P_1$ - $P_2$  และแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภาระไฟฟ้า ดังนั้น แรงบิดที่ทำให้ MC เคลื่อนที่ซึ่งแปรผันตามผลคูณของ  $i_f$  กับ  $i_m$  จะชี้บอกค่ากำลังไฟฟ้าที่แปรผันตามกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของภาระไฟฟ้าดังต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_m \cdot i_f dt = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_f}{\sqrt{2}} \cos \phi = VI \cos \phi \quad \dots\dots\dots(1.38)$$

ทั้งนี้  $V$  และ  $I$  เป็นค่า Effective ส่วน  $\cos \phi$  เท่ากับเพาเวอร์แฟกเตอร์ และ  $T = 2\pi/\omega$



รูปที่ 1.87 เครื่องวัดแบบ Electrodynamic

(4) เครื่องวัดแบบ Thermoelectric

เป้าหมายการวัดได้แก่กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 100 MHz (ทั้งนี้ในกรณีของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะรองรับได้ไม่เกิน 100 kHz เนื่องจากคุณลักษณะด้านความถี่ของลวดตัวนำ) ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 1 mA–5 A, 1 V–100 V

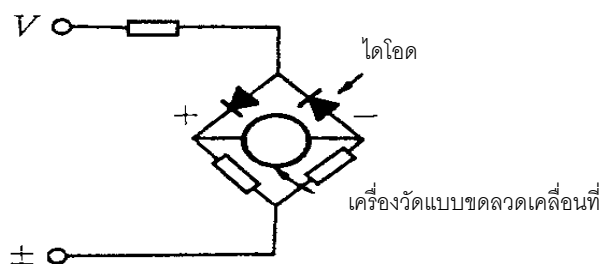
หลักการการทำงานจะใช้ thermoelectromotive force ที่เกิดจาก thermocouple ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่

การทำงานจะวางลวดตัวนำติด Thermocouple ไว้ในทรงกลมสูญญากาศ แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าที่จะวัดให้ไหลผ่านลวดตัวนำนั้น Joule heat ซึ่งแปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ Thermocouple แล้วนำแรงดันไฟฟ้านี้ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่ด้วยโครงสร้างทำนองเดียวกับเครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ ดังนั้น ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่า Effective ในการวัดแรงดันไฟฟ้า จะใช้ตัวนำแทนต่ออนุกรมเข้าไป

(5) เครื่องวัดแบบ Rectifier

เป้าหมายการวัดได้แก่กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 Hz–1 MHz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 100  $\mu$ A–0.1 A, 1 V–1 kV หลักการทำงานจะใช้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ที่มีวงจร Rectifier อยู่ภายใน

รูปที่ 1.88 แสดงการใช้วงจร Full-wave rectifier ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่ โดยจะเกิดแรงบิดขับเคลื่อนซึ่งแปรผันตรงกับค่าเฉลี่ยของ Full-wave แต่การสอบเทียบและกำหนด Scale จะใช้คลื่นไซน์เป็นเกณฑ์ ดังนั้น หากรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น เนื่องจากไดโอดมีขีดจำกัดของคุณลักษณะด้านความถี่ เครื่องวัดประเภทนี้จึงใช้กับความถี่ไม่เกิน 1 MHz



รูปที่ 1.88 Voltmeter แบบ rectifier

(6) เครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำ

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 Hz–500 Hz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 0.1 A–100 A, 1 V–100 V

หลักการงานจะใช้ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือสนามแม่เหล็กหมุนกับกระแสไหลวน (Eddy current) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากสนามแม่เหล็กนั้น

เครื่องวัดแบบนี้ที่รู้จักกันดีที่สุด ได้แก่ Watt-hour meter แบบเหนี่ยวนำสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 1.89 ซึ่งใช้สำหรับแสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป เครื่องวัดนี้มีขดลวดแรงดันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Psi_E$  ซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า และขดลวดกระแสจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Psi_I$  ซึ่งแปรผันตามกระแสของภาระไฟฟ้า โดย  $\Psi_E$  และ  $\Psi_I$  จะมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  และสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น โดยมีเฟสเข้าไปตามลำดับเรียงตาม  $\Psi_E$ ,  $\Psi_I$  และ  $-\Psi_I$  จะทำให้เกิดกระแสไหลวนในแผ่นจานอลูมิเนียม ทำให้เกิดแรงบิดปฏิกิริยาต่อสนามแม่เหล็กของกระแสไหลวนนี้กระทำต่อจานในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ดังนั้น ถ้าให้ความต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $E$  และกระแสไฟฟ้า  $I$  เท่ากับ  $\phi$  และค่า  $K$  เป็นค่าคงที่จากการออกแบบและลักษณะการพันขดลวดบนแกนเหล็กแล้ว แรงบิดจะมีค่าเท่ากับ

$$\tau_1 = K_1 EI \cos \phi \quad \dots\dots\dots (1.38)$$

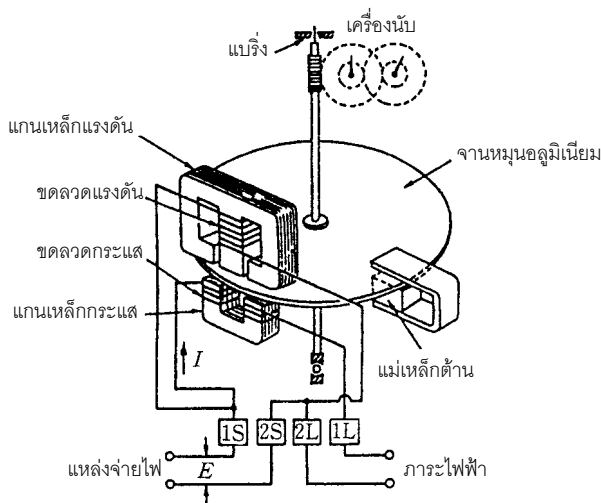
เมื่อความเร็วรอบของจานเท่ากับ  $n$  แล้ว แผ่นจานจะได้รับแรงบิดด้านที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  ของแม่เหล็กด้านเท่ากับ

$$\tau_2 = K_2 nB \quad \dots\dots\dots (1.39)$$

แผ่นจานจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่ทำให้แรงบิดทั้งสองสมดุลกัน ( $\tau_1 = \tau_2$ ) กล่าวคือ  $n = (K_1/K_2B) EI \cos \phi = K_c P$  ความเร็วรอบ  $n$  จึงแปรผันตามกำลังไฟฟ้า  $P$  ของภาระไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนรอบ  $N$  ที่แผ่นจานหมุนไปในเวลา  $t$  จะเท่ากับ  $nt$  ดังนั้น

$$N = K_c Pt \quad \dots\dots\dots (1.40)$$

เมื่อนับจำนวนรอบ  $N$  ด้วยเครื่องนับ จะได้ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า  $Pt$  ที่ใช้ไปในเวลา  $t$



รูปที่ 1.89 Watt-hour meter แบบเหนี่ยวนำสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ

(7) เครื่องวัดแบบไฟฟ้าสถิต

เป้าหมายการวัดได้แก่ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ความถี่ไม่เกิน 100 kHz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 1 V–100 kV

หลักการทำงานได้แก่แรงไฟฟ้าสถิตที่กระทำระหว่างแผ่นวัดที่มีประจุ 2 แผ่น

ขั้วของคาปาซิเตอร์ด้านหนึ่งจะเป็นขั้วไฟฟ้าอยู่นิ่ง อีกด้านหนึ่งจะเป็นขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งสปริงและเข็มชี้อยู่ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่จะวัด V ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง พลังงานไฟฟ้าสถิตที่สะสมในคาปาซิเตอร์ความจุ C จะเท่ากับ

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad \dots\dots\dots(1.41)$$

ดังนั้น จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ทำให้ขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งและขยับเข็มชี้ แรงขับเคลื่อน F นี้จะแปรผันตามกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า

$$F = K_s \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} K_s V^2 \frac{dC}{dx} \quad \dots\dots\dots(1.42)$$

ทั้งนี้  $K_s$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องวัด

ดังนั้น แรงดันที่เครื่องวัดช้บอก จึงเป็นค่า Effective เครื่องวัดแบบนี้ใช้กับการวัดไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความเป็นฉนวนสูง

(8) เครื่องวัดแบบ Transducer

เป้าหมายการวัดได้แก่ปริมาณทางฟิสิกส์ ปริมาณทางกลศาสตร์ ปริมาณทางเคมีต่างๆ ที่เหมาะสมกับเครื่องแปลงชนิดต่างๆ ช่วงการวัดจะอยู่ในช่วงที่เซ็นเซอร์สามารถรองรับได้

หลักการทำงานคือ ใช้ Device ที่สามารถแปลงปริมาณทางฟิสิกส์หรือเคมีต่างๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Transducer แล้วนำ Output ที่ได้ไปขับเครื่องวัดแบบเข็ม ตัวอย่างของ Transducer ชนิดต่างๆ มีดังต่อไปนี้

Transducer ทางแสง: Photoconductive cell (หรือ Photoresistor เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบ เช่น CdS เป็นต้น) Photovoltaic cell (Photoelectromotive force ของ pn junction) Photoelectric tube (ปรากฏการณ์ปลดปล่อย Photoelectron) Pyroelectric device (Polarized charge ที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อคุณกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น LiTaO<sub>3</sub>)

Transducer ด้านอุณหภูมิ: Thermocouple (ปรากฏการณ์ Seebeck) Thermistor (ค่าคงที่ของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำต่ออุณหภูมิ) Radiation thermometer (Thermocouple หรือ Pyroelectric device เป็นต้น) เทอร์โมมิเตอร์แสง (ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัตถุกับความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่แผ่รังสีออกมา)

Transducer ด้านกลศาสตร์: Strain gauge (การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจากความเค้นของโลหะผสม เช่น Manganin เป็นต้น) Displacement sensor (ตรวจจับการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสถิตหรืออินดักแตนซ์) Electromagnetic flowmeter (แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในของไหลนำไฟฟ้าที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก) Ultrasonic current meter (ผลต่างเวลาในการนำคลื่นอัลตราโซนิคในทิศทางรัศมีของท่อส่งของเหลว หรือปรากฏการณ์ Doppler)

### 1.2.2.2 เครื่องวัดดิจิทัล

เครื่องวัดดิจิทัลที่ใช้แสดงค่าที่วัดได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ รวมทั้งความต้านทานไฟฟ้า เรียกว่า ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ หรือ ดิจิทัลเทสเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย A/D converter เครื่องขยายสัญญาณขาเข้า Voltage divider อุปกรณ์แปลงปริมาณทางไฟฟ้าและฟิสิกส์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น A/D converter จะใช้แบบ Double integral กันมากที่สุดเนื่องจากได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าน้อยแม้จะมีความเร็วต่ำก็ตาม

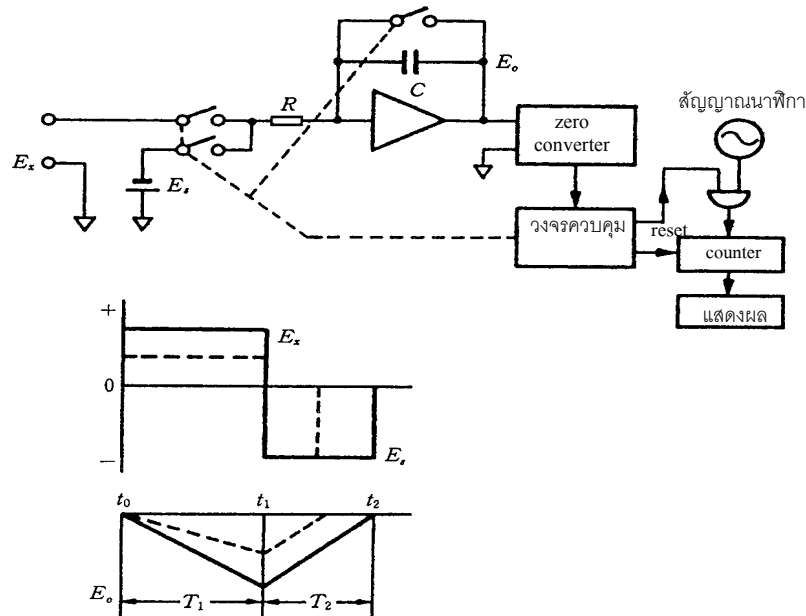
รูปที่ 1.90 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ A/D converter แบบ Double integral ซึ่งส่วนที่ประกอบด้วย Op-amp ตัวต้านทานต่ออนุกรม และคาปาซิเตอร์ต่อขนาน เรียกว่าวงจรมิลเลอร์ integrator เมื่อวงจรนี้ทำการอินทิเกรตสัญญาณขาเข้า  $E_x$  ไปเป็นระยะเวลา  $T_1$  แล้ว จะทำการอินทิเกรตแรงดันมาตรฐาน  $E_s$  ซึ่งมีขั้วกลับกับ  $E_x$  และตรวจวัดเวลา  $T_2$  ที่ทำให้สัญญาณขาออก  $E_o$  ของวงจรมิลเลอร์เป็นศูนย์ด้วย Comparator

$$\frac{1}{CR} \int_{t_0}^{t_1} E_x dt + \frac{1}{CR} \int_{t_1}^{t_2} (-E_s) dt = \frac{E_x T_1}{CR} - \frac{E_s T_2}{CR} = 0 \quad \dots\dots\dots (1.43)$$

ดังนั้น  $E_x = E_s (T_2/T_1)$  เนื่องจาก  $E_s$  และ  $T_1$  เป็นค่าที่รู้อยู่แล้ว หากวัดค่า  $T_2$  ได้ ก็สามารถคำนวณหา  $E_x$  ได้ การวัดค่า  $T_2$  จะเปิดวงจรเกตสร้างสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่  $f$  เป็นระยะเวลา  $T_2$  ( $= t_1 - t_2$ ) ส่งไปที่วงจรรนับ เพื่อนับจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่เข้ามา เนื่องจาก  $T_2 = n / f$  ดังนั้น

$$E_x = \frac{E_s n}{T_1 f} = k_c \cdot n \quad \dots\dots\dots (1.44)$$

กล่าวคือ เพียงแค่นับจำนวนสัญญาณนาฬิกาเท่านั้นก็สามารถทราบค่าแรงดันที่ต้องการวัดได้แล้ว ในการวัดปริมาณอื่นนอกเหนือจากกระแสตรง จะใช้ Transducer เข้ามาช่วย



รูปที่ 1.90 A/D Converter แบบ Double integral (Dual slope)

### 1.2.2.3 เครื่องบันทึกผล (Logger)

เครื่องบันทึกผลเป็นอุปกรณ์ที่บันทึกผลค่าที่วัดได้ที่เปลี่ยนแปลงไปลงบนกระดาษโดยอัตโนมัติ ซึ่งแบ่งออกตามกลไกการทำงานได้เป็นแบบ Direct drive กับแบบ Automatic balance โดยแบบแรกจะใช้พลังงานจากสัญญาณที่วัดได้มาขับปากกาบันทึกผลโดยตรง และแบบหลังจากรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเฉพาะ มาขับเซอร์โวมอเตอร์เพื่อขับปากกาโดยให้สัญญาณ Input กับสัญญาณ Feedback มีค่าเท่ากัน

กระดาษบันทึกผลมีทั้งแบบวงกลมและแบบแถบยาว ปัจจุบันที่ใช้กันมากจะเป็นแบบแถบยาว กลไกการบันทึกมีทั้งการบันทึกต่อเนื่องด้วยปากกาและแบบจุด หากบันทึกแบบจุดจะสามารถบันทึกได้หลายปริมาณ โดยใช้กลไกเพียง 1 ชุด นอกจากนี้บางครั้งยังใช้กระดาษไวความร้อนหรือ Electric-sensitive recording paper ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้หมึกอีกด้วย

### 1.2.2.4 Oscilloscope

Oscilloscope เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเกตรูปคลื่น ความถี่ เฟส ฯลฯ ด้วยการนำรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า มาฉายลงบนจอภาพ CRT โดยให้แกนนอนแสดงเวลา แกนตั้งแสดง Amplitude อุปกรณ์นี้บางครั้งก็เรียกว่า Synchroscope เนื่องจาก มีกลไกในการ Synchronize แกนเวลาของจอภาพกับสัญญาณ Input หากป้อนสัญญาณ  $x(t)$  ต่างหากให้แก่แกนนอน แทนที่จะป้อนสัญญาณแกนเวลาไว้แล้ว จะได้รูปคลื่นประกอบกับสัญญาณ  $y(t)$  ที่ป้อนให้แก่แกนตั้ง ซึ่งเป็นกราฟ x-y ที่เรียกว่า Lissajous figure

สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดเป็นคาบด้วยความถี่ต่ำ เช่น ไมกี่ Hz หรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงครั้งเดียว หากใช้ Oscilloscope ทั่วไปจะไม่สะดวกในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นตามเวลา ดังนั้น จึงใช้ Storage oscilloscope ซึ่งสามารถบันทึกค่าสัญญาณไว้ได้ นอกจากนี้ ยังมี Digital memory oscilloscope ซึ่งใช้ A/D converter แปลงสัญญาณ Input ให้เป็นข้อมูลดิจิทัล บันทึกไว้ในหน่วยความจำ IC แล้วนำไปประมวลผลต่อไปอีกด้วย

กรณีที่สัญญาณ Input มีความถี่สูงถึง 400-500 MHz แล้ว Oscilloscope ทั่วไปจะไม่สามารถติดตามสัญญาณได้ทัน จึงจำเป็นต้องใช้ Sampling oscilloscope อุปกรณ์นี้จะสุ่มวัดรูปคลื่น Input ด้วยคาบ  $(T + \Delta t)$  ซึ่งมีค่ามากกว่าคาบ T ของสัญญาณ Input เล็กน้อย ดังนั้น จุบนจอ CRT จะออกไปคาบละ  $\Delta t$  วิธีนี้ทำให้สามารถสังเกตปรากฏการณ์ที่มีความถี่สูงถึง 10 GHz ได้

## 1.2.3 วิธีการวัด

### 1.2.3.1 การวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

#### (1) การวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

โดยทั่วไปจะใช้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่ที่สามารถรับกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ไม่เกิน 10 mA เท่านั้น หากต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่านั้น จะต้องต่อ Shunt (ความต้านทานของ Shunt เท่ากับ  $R_s$ ) ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ดังรูปที่ 1.91 ถ้าความต้านทานภายในเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $r_A$  ให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ  $I_A$  แล้ว กระแสไฟฟ้าที่จะวัด I จะคำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

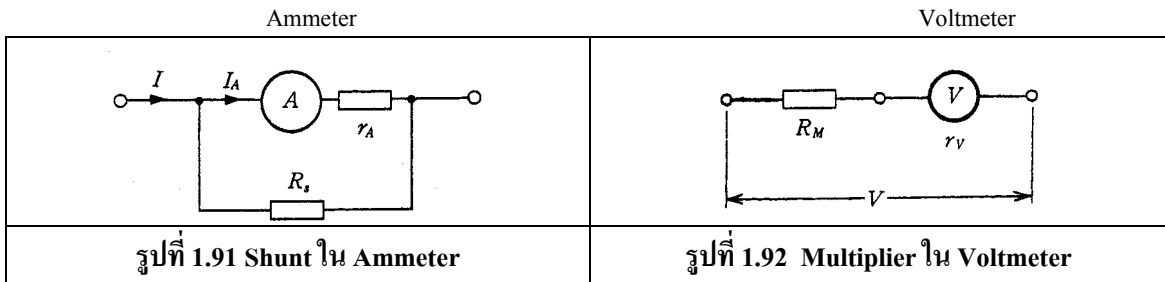
$$I = \frac{r_A + R_S}{R_S} I_A = m_A I_A \quad \dots\dots\dots (1.45)$$

ค่า  $m_A$  เรียกว่า scale factor ของ ammeter โดยที่หน้าปัดจะเขียนตัวเลขที่คูณด้วยค่านี้ไว้แล้ว

สำหรับ Voltmeter กรณีที่จะวัดไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง จะใช้ Multiplier (ความต้านทาน  $R_M$ ) ต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ดังรูป 1.92 ถ้าความต้านทานภายในของ Voltmeter เท่ากับ  $r_V$  ให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเคลื่อนที่เท่ากับ  $V_V$  แล้ว แรงดันไฟฟ้าสูงสุด  $V$  ที่สามารถวัดได้จะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$I = \frac{r_V + R_M}{r_V} V_V = m_V V_V \quad \dots\dots\dots (1.46)$$

ค่า  $m_V$  เรียกว่า Scale factor ของ Voltmeter หากใช้สวิตซ์ในการเลือกใช้ Multiplier หลายๆ ตัว จะเรียกว่า Multi-range voltmeter



(2) การวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การวัดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมากจะแสดงค่า Effective ดังนั้นหน้าปัด Voltmeter และ Ammeter กระแสสลับทั่วไปจึงมักแสดงว่า Effective กรณีที่จะวัดค่าที่สูงกว่าพิสัยของเครื่องวัด จะใช้หม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด (หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าหรือหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า) โดยพันขดลวดปฐมภูมิรอบแกนเหล็กจำนวน  $n_1$  รอบ และขดลวดทุติยภูมิจำนวน  $n_2$  รอบ

กรณีที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น จะต่อขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าอนุกรมกับเส้นทางที่มีกระแสไฟฟ้าที่จะวัด  $i_1$  ไหลผ่านดังรูปที่ 1.93 ถ้าให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Ammeter เท่ากับ  $i_2$  จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current ratio) จะได้ว่า

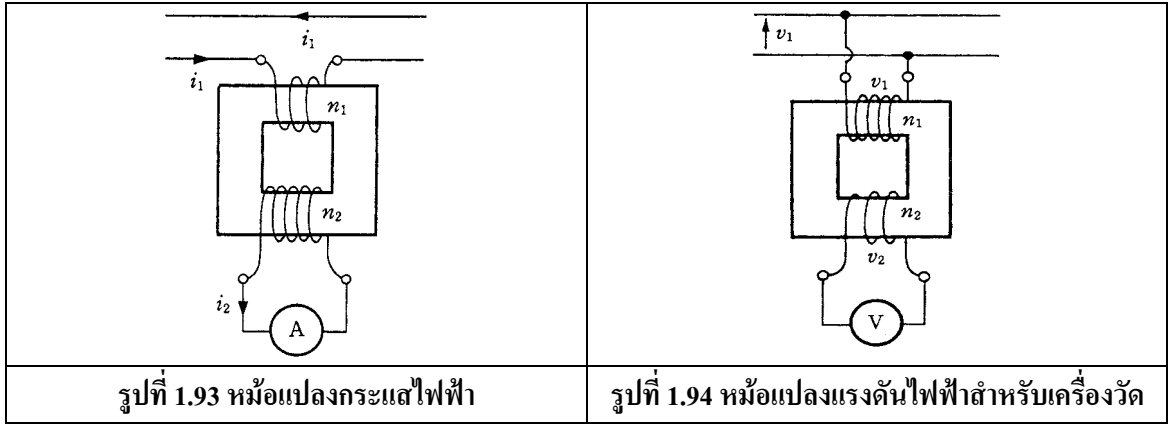
$$i_1 = \frac{n_1}{n_2} i_2 \quad \dots\dots\dots (1.47)$$

ถ้า  $n_2 \gg n_1$  แล้ว จะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าพิสัยมากๆ ได้

กรณีที่ต้องการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น จะต่อขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเหมือนกับการวัดแรงดันไฟฟ้า  $v_1$  ตกคร่อมจุดที่จะวัด ถ้า Voltmeter ชี้ออกค่า  $v_2$  จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage ratio) จะได้ว่า

$$v_1 = \frac{n_1}{n_2} v_2 \quad \dots\dots\dots (1.48)$$

อนึ่ง Current ratio และ Voltage ratio ในทางปฏิบัติจะไม่เท่ากับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด เนื่องจาก Exciting current และอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ดังนั้น จึงต้องชดเชยด้วยการลดจำนวนรอบของขดลวดด้านที่มีจำนวนรอบมากกว่าประมาณ 1%

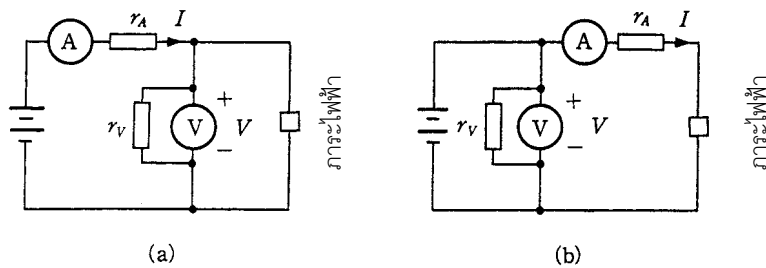


### 1.2.3.2 การวัดกำลังไฟฟ้า

#### (1) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงไปในภาวะไฟฟ้าความต้านทาน สามารถวัดได้ด้วยการต่อ Voltmeter และ Ammeter ตามวิธีที่แสดงในรูปที่ 1.95 (a) หรือ (b) เมื่อให้ความต้านทานภายในของ Voltmeter และ Ammeter เท่ากับ  $r_v$ ,  $r_A$  และให้ค่าที่เครื่องวัดแต่ละตัวชี้บอกเท่ากับ  $V$  และ  $I$  ตามลำดับแล้ว กำลังไฟฟ้า  $P$  จะเท่ากับ

$$(a) P = VI - \frac{V^2}{r_v}, \quad (b) P = VI - r_A I^2 \quad \dots\dots\dots(1.49)$$



รูปที่ 1.95 การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ Voltmeter และ Ammeter

กรณีที่สามารถไม่คิดถึงความต้านทานภายในของเครื่องวัดได้ กล่าวคือ  $r_v = \square$  หรือ  $r_A = 0$  จะได้ว่า  $P = VI$

#### (2) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

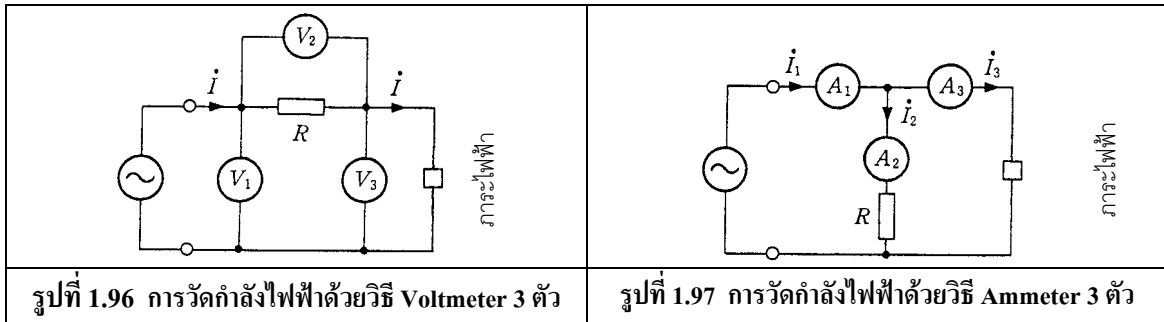
โดยทั่วไป การวัดกำลังไฟฟ้าจริง  $VI \cos \Phi$  จะใช้ Wattmeter แบบ Electrodynamicmeter โดยป้อนกระแสไฟฟ้า  $I$  ให้ขดลวดอยู่นิ่ง และป้อนกระแสไฟฟ้า  $V$  ให้ขดลวดเคลื่อนที่ ในการวัดที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำเนื่องจาก Iron loss และ Corona loss ฯลฯ นั้น การวัดจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก ดังนั้น จึงใช้ Wattmeter แบบเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ซึ่งมี FSD (Full-scale deflection) ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ 0.1-0.2 การวัดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  $VI \sin \Phi$  จะใช้ Reactive power meter ซึ่งจะเลื่อนเฟสของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าของ Wattmeter ไป  $90^\circ$  นอกจากนี้ ยังมีวิธีวัดโดยใช้ Voltmeter 3 ตัว และวิธีวัดโดยใช้ Ammeter 3 ตัวอีกด้วย

วิธีวัดโดยใช้ Voltmeter 3 ตัว จะนำ Voltmeter ที่มีความต้านทานภายในสูง 3 ตัว และตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ R มาต่อตามรูปที่ 1.96 วัดแรงดันไฟฟ้า Effective ได้  $V_1, V_2, V_3$  แล้วนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{1}{2R}(V_1^2 - V_2^2 - V_3^2) \quad \dots\dots\dots(1.50)$$

วิธีวัดโดยใช้ Ammeter 3 ตัว จะนำ Ammeter ที่มีความต้านทานภายในต่ำ 3 ตัว และตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ R มาต่อตามรูป 1.97 วัดกระแสไฟฟ้า Effective ได้  $I_1, I_2, I_3$  แล้วนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{R}{2}(I_1^2 - I_2^2 - I_3^2) \quad \dots\dots\dots(1.51)$$



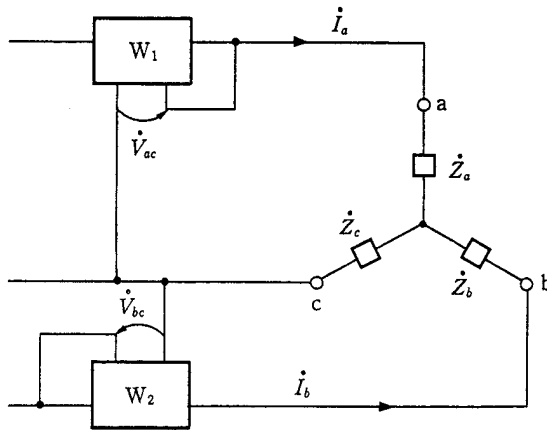
(3) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สามารถทำได้โดยการนำ Wattmeter เฟสเดียว 3 ตัว มาต่อกับแต่ละเฟส แล้วหาผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าของมิเตอร์แต่ละตัว

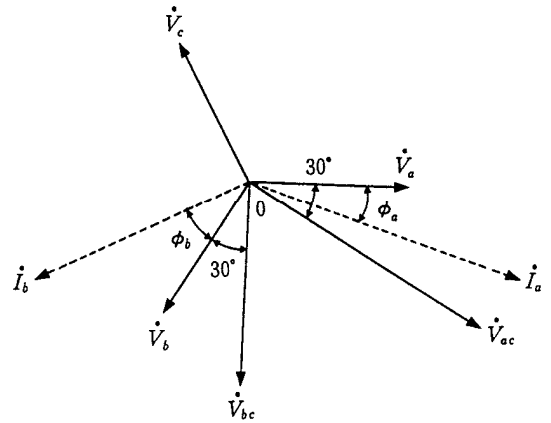
กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ n เฟสในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ n เฟส n สาย ไม่ว่าภาวะไฟฟ้าจะสมดุลหรือไม่ก็ตาม จะสามารถวัดได้โดยใช้ Wattmeter เฟสเดียวจำนวน (n - 1) ตัว และกำลังไฟฟารวมจะเท่ากับผลบวกของค่าที่วัดได้จากมิเตอร์แต่ละตัว (Brondel's theorem) ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของวงจร 3 เฟส จะสามารถวัดได้ด้วยวิธี Wattmeter 2 ตัว ซึ่งใช้ ซึ่งใช้ Wattmeter เฟสเดียวจำนวน 2 ตัว กรณีของวงจร 3 เฟส 3 สาย ถ้าเราคิดว่าสายเฟส c เป็นทางไหลกลับของกระแสไฟฟ้าแล้ว กำลังไฟฟ้า (ค่าในขณะใดๆ) ที่แหล่งจ่ายไฟจ่ายให้แก่ภาวะไฟฟ้า จะเท่ากับ  $p = v_{ac} i_a + v_{bc} i_b$  ดังนั้น ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย  $\dot{V}_{ac}$  และ  $\dot{V}_{bc}$  และกระแสเฟส  $i_a$  และ  $i_b$  ให้แก่ Wattmeter 2 ตัวดังรูปที่ 1.98 (a) แล้ว จะสามารถวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสได้

ถ้าให้ความต่างเฟสระหว่าง  $\dot{V}_a$  กับ  $i_a$  เท่ากับ  $\phi_a$  ให้ความต่างเฟสระหว่าง  $\dot{V}_b$  กับ  $i_b$  เท่ากับ  $\phi_b$  แล้ว เนื่องจากระหว่างแรงดันเฟสกับแรงดันระหว่างสายจะมีความต่างเฟสเท่ากับ  $30^\circ$  ดังผังเวกเตอร์ในรูป 1.98 (b) ดังนั้น จึงคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง P ได้ดังต่อไปนี้

$$P = P_1 + P_2 = V_{ac} I_a \cos(\phi_a - 30^\circ) + V_{bc} I_b \cos(\phi_b + 30^\circ) \quad \dots\dots\dots(1.52)$$



(a) วิธีต่อวัตต์มิเตอร์



(b) ฟังเวกเตอร์

รูปที่ 1.98 การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสด้วยวิธี Wattmeter 2 ตัว

โดย  $V_{ac}$  และ  $V_{bc}$  เป็นค่า Effective ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และ  $I_a$  และ  $I_b$  เป็นค่า Effective ของกระแสเฟส ดังนั้น

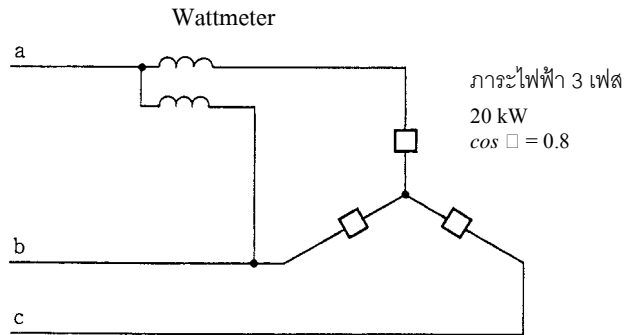
- (a) ถ้า  $-30^\circ < \phi_a, \phi_b < 30^\circ$  แล้ว  $P_1, P_2$  จะเป็นบวก
- (b) ถ้า  $-30^\circ = \phi_a, \phi_b = 30^\circ$  แล้ว  $P_1, P_2$  จะเป็นศูนย์
- (c) ถ้า  $\phi_a < -30^\circ$  แล้ว  $P_1$  จะเป็นลบ ถ้า  $30^\circ < \phi_b$  แล้ว  $P_2$  จะเป็นลบ

เนื่องจาก Wattmeter จะชี้แต่ค่าบวกเท่านั้น ดังนั้น กรณีที่  $P_1$  หรือ  $P_2$  เป็นลบ จะต้องกลับขั้วของ Wattmeter ที่เข็มชี้ไปทางด้านลบ แล้วนำค่าที่มิเตอร์ทั้งสองชี้มาหาผลต่างเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

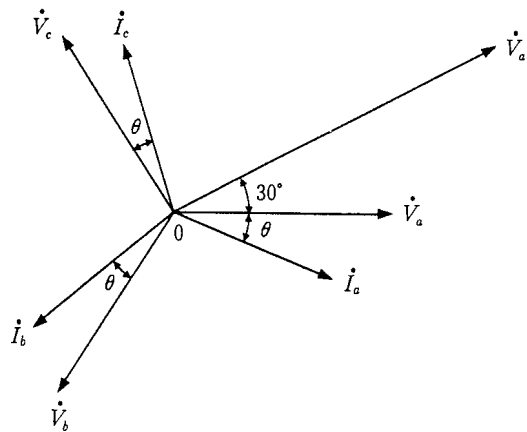
หนึ่ง ในการปฏิบัติงานจริงๆ มักจะใช้ Wattmeter 3 เฟส ซึ่งสามารถระบุกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสได้โดยตรงด้วยเข็มชี้เพียง 1 อัน แต่หลักการทำงานต่อมิเตอร์ก็เหมือนกับวิธี Wattmeter 2 ตัว

กรณีของภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมูล เราสามารถใช้วิธี Wattmeter 1 ตัว ซึ่งมีหลักการการทำงานเหมือนกับวิธี Wattmeter 2 ตัวได้ กล่าวคือ ต่อสวิตช์สลับสายกับขดลวดแรงดันของ Wattmeter เฟสเดียว 1 ตัว แล้วหาค่ากำลังไฟฟ้าจากผลบวกของค่าที่มิเตอร์ชี้บอกเมื่อสลับระหว่างสาย 2 เส้นของภาระไฟฟ้า 3 เฟส ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างสาย 2 เส้นในกรณีนี้

รูปที่ 1.99 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลที่มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 20 kW มีเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Lagging) เท่ากับ 0.8 ถ้าให้ลำดับของเฟสเท่ากับ a-b-c เมื่อคำนวณหาค่าที่ Wattmeter จะชี้บอกเมื่อต่อมิเตอร์ระหว่างเฟส a-b จะได้อะไรต่อไปนี้



รูปที่ 1.99 ตัวอย่างตัวเลขในการวัดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 1.113 ผังเวกเตอร์แสดงตัวอย่างค่าในการวัดกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 1.100 แสดงผังเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ ซึ่งถ้าให้มุมเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าเท่ากับ  $\theta$  แล้ว เนื่องจากความต่างเฟสระหว่างแรงดัน  $V_{ab}$  กับกระแส  $I_a$  เท่ากับ  $(30^\circ + \theta)$  ดังนั้นค่าที่ Wattmeter ชี้ออก  $P_{ab}$  จะเท่ากับ

$$P_{ab} = V_{ab} I_a \cos(30^\circ + \theta) = VI(\cos 30^\circ \cos \theta - \sin 30^\circ \sin \theta)$$

ทั้งนี้ให้แรงดันระหว่างสาย  $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = V$  กระแสสาย  $I_a = I_b = I_c = I$  และใช้ addition theorem เข้าช่วย ถ้าให้เพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าเท่ากับ  $\cos \theta$  แล้ว ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า 3 เฟส  $P = \sqrt{3}VI \cos \theta$  ดังนั้น เมื่อนำ  $VI = P / \sqrt{3} \cos \theta$  เข้าไปแทนค่าในความสัมพันธ์ข้างต้น จะได้ว่า

$$P_{ab} = \frac{P}{\sqrt{3} \cos \theta} (\cos 30^\circ \cos \theta - \sin 30^\circ \sin \theta)$$

เมื่อแทนค่า  $P = 20 \text{ kW}$ ,  $\cos \theta = 0.8$ ,  $\sin \theta = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6$  และ  $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$ ,  $\sin 30^\circ = 1/2$  ลงไปในความสัมพันธ์นี้ จะได้ว่า

$$P_{ab} = \frac{20}{\sqrt{3} \times 0.8} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.8 - \frac{1}{2} \times 0.6 \right) \approx 10 - 4.33 = 5.67 \text{ kW}$$

### 1.2.3.3 การวัดความถี่

เมื่อป้อนคลื่นไซน์ที่มีความถี่พื้นฐานเปลี่ยนแปลงได้  $x(t) = A \sin(\omega_1 t + \theta_1)$  ให้แก่แกนนอนของ Oscilloscope และป้อนคลื่นไซน์ที่ไม่ทราบความถี่  $y(t) = B \sin(\omega_2 t + \theta_2)$  ให้แก่แกนตั้งแล้ว จะเกิดภาพ Lissajous figure ขึ้น หาก  $\omega_1 = \omega_2$  แล้วภาพนี้จะหยุดนิ่งเป็นรูปวงรี ดังนั้น เราจึงสามารถวัด  $\omega_2$  ได้ด้วยการปรับ  $\omega_1$

สำหรับวิธีการใช้เครื่องนับความถี่ จะแปลงรูปคลื่นที่ไม่ทราบความถี่ให้เป็นคลื่นรูป Pulse ด้วยวงจรแปลงรูปคลื่น นำไปป้อนผ่านวงจรเกตในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แล้วใช้วงจรนับจำนวน Pulse ที่วิ่งผ่านในช่วงระยะเวลานั้น โดยทั่วไปวงจรนับจะใช้วงจร Flip-flop (bistable multivibrator)

นอกจากนี้ ยังมีวิธี Heterodyne wavemeter วิธีคำนวณจากเงื่อนไขสมดุลโดยทำให้เกิด Resonance กับ Bridge และวิธีอื่นๆ อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของคลื่นผิดเพี้ยนซึ่งประกอบด้วยความถี่จำนวนมาก จะใช้วิธีนำคลื่นที่วัดมาแปลง A/D แล้วใช้คอมพิวเตอร์แปลง Fast Fourier Transformation (FFT) เพื่อแสดง Spectrum ออกมา

### 1.2.3.4 การวัดความต่างเฟส

การวัดความต่างเฟสระหว่างคลื่นไซน์ 2 คลื่นที่มีความถี่เท่ากัน เมื่อป้อน  $x(t) = A \sin \omega t$  ให้แกนนอน และ  $y(t) = B \sin(\omega t + \theta_2)$  ให้แกนตั้งแล้ว เนื่องจากคลื่นทั้งสองมีความถี่เท่ากัน ดังนั้น ส่วนความต่างเฟสสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{B}{A} \quad \dots\dots\dots (1.53)$$

หากใช้ Oscilloscope ที่มี 2 channel จะสามารถวัดผลต่างเวลา  $\Delta t$  ที่คลื่นทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ หากทราบคาบ T ของคลื่นแล้ว ก็สามารถหาความต่างเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$\theta = 2\pi \times \frac{\Delta t}{T} \quad \dots\dots\dots (1.54)$$

กรณีที่ต้องการวัดความต่างเฟสด้วยความเที่ยงตรงสูง จะใช้วิธีแปลงคลื่นทั้งสองเป็น pulse นำไปวัดผลต่างเวลาระหว่างคลื่นทั้งสอง  $\Delta t$  และคาบ T ด้วยวงจรถ่าย แล้วนำไปผ่านวงจรคำนวณสูตร (1.54) เพื่อแสดงความต่างเฟส

### 1.2.3.5 การวัดความต้านทาน

ค่าความต้านทานน้อยๆ ไม่เกิน  $1 \Omega$  นั้น จะวัดโดยใช้ Potentiometer หรือวัดโดยหาสมดุลของ Kelvin double bridge ค่าความต้านทานในช่วง  $1 \Omega - 1 M\Omega$  โดยทั่วไปมักจะวัดด้วยวิธีกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยนำ Ammeter มาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต้องการวัด และนำ Voltmeter มาต่อขนานกับตัวต้านทานที่ต้องการวัด แล้วคำนวณหาความต้านทานจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้กฎของโอห์ม นอกจากนี้ ในการวัดง่ายๆ จะใช้ Tester แต่ถ้าต้องการวัดให้เที่ยงตรง จะวัดโดยหาสมดุลของ Wheatstone bridge สำหรับการวัดความต้านทานที่มีค่าสูงตั้งแต่  $1 M\Omega$  ขึ้นไป โดยทั่วไปจะวัดด้วย Megger (Insulation resistance tester) ในการวัดความต้านทานของสายดิน จะใช้ขั้วไฟฟ้าต่อสายดินกับขั้วไฟฟ้าวัด 2 ขั้ว แล้วปรับตัวต้านทานปรับค่าได้แบบสไลด์ให้แรงดันไฟฟ้าสมดุล นำอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า ณ จุดสมดุลไปคำนวณความต้านทานระหว่างตัวนำที่ต่อสายดินกับกราวด์

1.2.3.6 การวัดอิมพีแดนซ์

การวัดอิมพีแดนซ์อย่างเที่ยงตรง จะใช้ Bridge กระแสสลับ เช่น Bridge 4 ด้านกระแสสลับ หรือ Transformer bridge รูปที่ 1.101 แสดง bridge 4 ด้านกระแสสลับที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ

กระแสสลับ  $\dot{E}$  เครื่องตรวจจذب D อิมพีแดนซ์  $\dot{Z}_1-\dot{Z}_4$  ซึ่งประกอบเป็นด้านทั้ง 4 ด้านของ Bridge เมื่อปรับอิมพีแดนซ์ของแต่ละด้านให้ Bridge สมดุล กล่าวคือ Output ของเครื่องตรวจจذبเท่ากับศูนย์แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

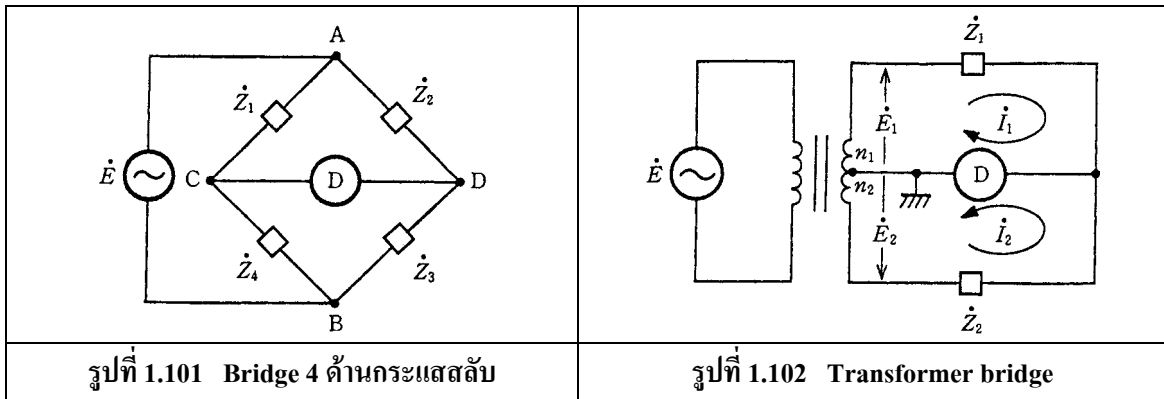
$$\dot{Z}_1\dot{Z}_3 = \dot{Z}_2\dot{Z}_4 \quad \dots\dots\dots(1.55)$$

หากทราบอิมพีแดนซ์ของ 3 ด้าน ก็สามารถหาอิมพีแดนซ์ของด้านที่เหลือได้ ทั้งนี้ เนื่องจาก  $\dot{Z}_1-\dot{Z}_4$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้น เงื่อนไขของสมมูลข้างต้นจึงต้องสอดคล้องกับความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ส่วนจริงของ } (\dot{Z}_1\dot{Z}_3) = \text{ส่วนจริงของ } (\dot{Z}_2\dot{Z}_4) \text{ และ ส่วนจินตภาพของ } (\dot{Z}_1\dot{Z}_3) = \text{ส่วนจินตภาพของ } (\dot{Z}_2\dot{Z}_4) \dots(1.56)$$

ใน Bridge นี้ กรณีที่ความจุไฟฟ้าสถิตต่อกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟและเครื่องตรวจจذب อาจส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขสมมูลจะต้องต่อกราวด์ระหว่าง C-D ในรูปให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับกราวด์ในสภาพสมมูล การต่อกราวด์นี้เรียกว่า Wagner ground

นอกจากนี้ ทุกๆ ส่วนของ Bridge 4 ด้านกระแสสลับยังมี Stray capacitance อยู่ ซึ่งการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นอาจทำให้แหล่งจ่ายไฟส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขสมมูลได้ ในกรณีนี้ควรใช้ Transformer bridge ดังต่อไปนี้



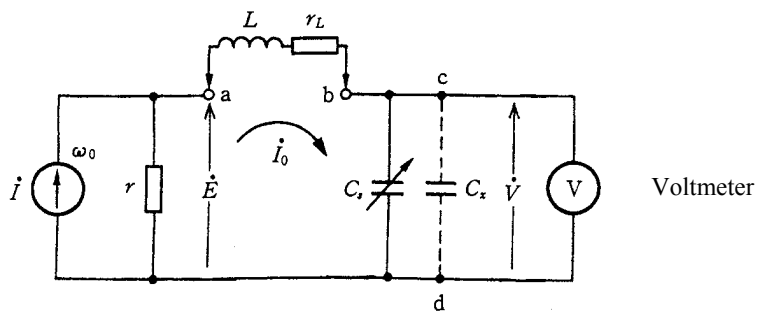
รูปที่ 1.101 แสดงหลักการวัดโดยใช้ Transformer bridge เงื่อนไขสมมูลที่ทำให้ Output ของเครื่องตรวจจذبเป็นศูนย์คือ  $I_1 = I_2$  ซึ่งในภาวะสมมูล  $\dot{E}_1 = \dot{Z}_1 I_1$  และ  $\dot{E}_2 = \dot{Z}_2 I_2$  นอกจากนี้  $\dot{E}_1$  และ  $\dot{E}_2$  ยังแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลง  $n_1$  และ  $n_2$  ดังนั้น เมื่อ Bridge อยู่ในภาวะสมมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆ จึงมีดังต่อไปนี้

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2}, \quad \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} \quad \dots\dots\dots(1.57)$$

เนื่องจาก  $\dot{E}_1$  และ  $\dot{E}_2$  มีเฟสตรงกัน ดังนั้น  $\dot{Z}_1$  และ  $\dot{Z}_2$  จะมีเฟสตรงกันด้วย หากทราบค่า  $\dot{Z}_1$  หรือ  $\dot{Z}_2$  ค่าใดค่าหนึ่ง ก็สามารถวัดอิมพีแดนซ์ของอีกด้านหนึ่งได้

การวัดอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่สูง ทำได้โดยนำวงจรที่ต้องการวัดมาทำให้เกิด Resonance แล้วหาอิมพีแดนซ์จากเงื่อนไขของ Resonance นั้นซึ่งมีหลายวิธี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดอิมพีแดนซ์ของขดลวดหรือความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์ โดยมากมักจะใช้ Q-meter ซึ่งเป็นวิธี Resonance รูปแบบหนึ่ง รูปที่ 1.103 แสดงหลักการวัดด้วย Q-meter ในการวัดอิมพีแดนซ์ อันดับแรกจะปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ  $i = I \sin \omega t$  จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ทำให้ที่ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ  $r$  เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $\dot{E} = E \sin (\omega t + \theta)$  ต่อไปจะนำอินดักเตนซ์  $L$  ที่ต้องการวัดมาต่อระหว่างจุด a-b แล้วปรับคาปาซิเตอร์ปรับค่าได้มาตรฐาน  $C_s$  ให้วงจรอยู่ในภาวะ Resonance ซึ่งที่ความถี่ Resonance  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_s}$  ค่า effective ของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วของ  $C_s$  จะมีค่าสูงสุด และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$V = \frac{E}{\omega_0 C_s r_L} = \frac{\omega_0 L}{r_L} = QE \quad \dots\dots\dots(1.58)$$



รูปที่ 1.103 ภาพแสดงหลักการทำงานของ Q-meter

ทั้งนี้  $r_L$  เป็นความต้านทานสูญเสียของขดลวดอินดักเตนซ์ เมื่อวัด  $V$  โดยให้แรงดัน  $E$  คงที่แล้ว จะหาค่า  $Q$  ของขดลวดได้ Q-meter จะบอกค่า  $Q$  ไว้ที่หน้าปัดของ Voltmeter และหาค่า  $L$  กับ  $r_L$  ได้จาก  $\omega_0$  และ  $C_s$  ที่ทำให้ค่า  $Q$  นี้มีค่าสูงสุด

การวัดความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์จะใช้วิธีทำนองเดียวกับข้างต้น โดยเมื่อทำให้  $L$  กับ  $C_s$  เกิดการ Resonance กันแล้วก็นำคาปาซิเตอร์  $C_x$  ที่ต้องการวัด มาต่อระหว่างจุด c-d โดยรักษา  $\omega_0$  ให้คงที่ เมื่อปรับคาปาซิเตอร์ปรับค่าได้มาตรฐาน  $C_s$  จนกลายเป็นภาวะ Resonance อีกครั้ง ค่า  $C_s$  จะเปลี่ยนไปเป็น  $C'_s$  ค่าที่ต้องการวัดจะคำนวณได้จาก  $C_x = C_s - C'_s$

### 1.3 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าในอาคาร/โรงงาน (How to energy is used in building/Factory)

การก่อสร้างอาคารทุกหลังจะต้องทำตามพระราชบัญญัติและกฎข้อบังคับของการก่อสร้างระดับชาติและระดับท้องถิ่น กฎข้อบังคับเหล่านี้มีไว้เพื่อให้ขณะการก่อสร้างอาคารมีความปลอดภัยต่อคนงานก่อสร้าง และผู้สัญจรไปมาและหลังจากสร้างเสร็จต้องให้ความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร เนื่องจากการป้องกันไฟไหม้เป็นเรื่องที่สำคัญมาก

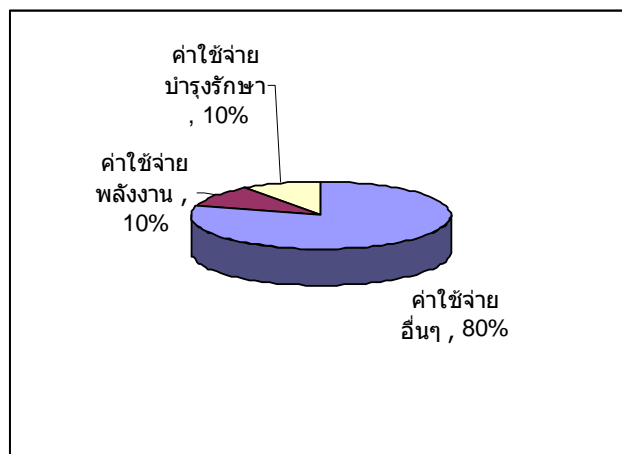
สำหรับการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้านั้น มีข้อแนะนำและข้อกำหนดอยู่มากมาย เช่น

1. มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยของ ว.ส.ท
2. มาตรฐาน NEC
3. มาตรฐาน IEC

มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยของ ว.ส.ท ส่วนมากจะแปลและเรียบเรียงจาก National Electrical Code (NEC) ของประเทศสหรัฐอเมริกา และในขณะนี้ก็มีอีกมาตรฐานหนึ่งซึ่งผู้ออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าควรจะต้องหาไว้และศึกษา เนื่องจากคาดว่าจะเป็มาตรฐานสากลในอนาคต นั่นคือ มาตรฐาน IEC 60364 “Electrical Installation of Building” สำหรับ NEC นั้นเขียนได้ครอบคลุมมากทำให้อ่านทำความเข้าใจได้ยาก จึงต้องมีหนังสือคู่มือ คือ NEC Handbook หนังสือคู่มือนี้จะอธิบายกฎข้อบังคับต่างๆ ของ NEC อย่างละเอียด และมีการยกตัวอย่างและรูปประกอบด้วย ข้อแนะนำของ NEC จะเป็ความต้องการขั้นต่ำ (Minimum Requirements) วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาสภาพที่แท้จริงของแต่ละงาน และออกแบบระบบไฟฟ้าตามความต้องการนั้น

### 1.3.1 การใช้ไฟฟ้าในอาคาร

โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานในอาคารมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 10 ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคาร ทั้งหมด ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าจ้าง ค่าภาษี และค่าบุคลากรแต่เราสามารถลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้โดยการประหยัดพลังงาน ในขณะที่ค่าใช้จ่ายอื่นๆ มักจะเป็ค่าใช้จ่ายที่ยากจะควบคุม นอกจากนี้การประหยัดพลังงานซึ่งเป็การใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็จะลดลงด้วย



ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

#### รูปที่ 1.104 สัดส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคาร

รูปที่ 1.104 สัดส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคารอาคารแต่ละประเภทจะใช้ไฟฟ้ามากกว่าความร้อน โดยใช้ในระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปั้มน้ำ ลิฟต์ บันไดเลื่อน อุปกรณ์สำนักงาน และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

ตาราง 1.5 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนในอาคารประเภทต่างๆ

ประเภทของอาคาร	ไฟฟ้า (%)	ความร้อน (%)
สำนักงาน	100	-
ศูนย์การค้า	100	-
สถานศึกษา	100	-
โรงแรม	75	25
โรงพยาบาล	80	20

ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

สัดส่วนการใช้พลังงานของระบบต่างๆ นั้นจะแตกต่างกันในแต่ละประเภทของอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 1.5 ระบบปรับอากาศและแสงสว่างมีสัดส่วนในการใช้ไฟฟ้ามาก โดยมีสัดส่วนรวมกัน สูงถึงร้อยละ 80 ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร ส่วนที่เหลือร้อยละ 15-20 จะถูกใช้ในระบบอื่นๆ ได้แก่ ปั๊มน้ำ ลิฟต์ บันไดเลื่อน ตู้แช่เย็น อุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น ส่วนพลังงานความร้อน จะถูกใช้สำหรับหุงต้ม ผลิตไอน้ำ น้ำร้อนเพื่อการซักล้าง ริดผ้า และอบนึ่งฆ่าเชื้อโรคของอุปกรณ์หรือเครื่องมือแพทย์ใน โรงพยาบาล

ตารางที่ 1.6 แสดงสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในอาคารประเภทต่างๆ แบ่งตามระบบต่างๆ

ประเภทของอาคาร	ปรับอากาศ (%)	แสงสว่าง (%)	อื่นๆ (%)
สำนักงาน	55	30	15
ศูนย์การค้า	62	23	15
สถานศึกษา	38	40	22
โรงแรม	65	18	17
โรงพยาบาล	55	25	20

ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

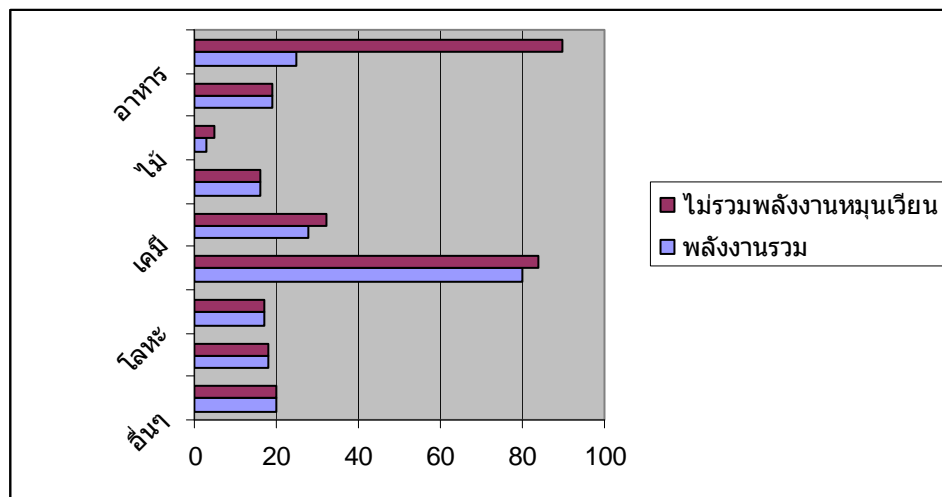
### 1.3.2 การใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

การใช้พลังงานใน โรงงานมีลักษณะที่แตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมถูกแบ่งออกเป็น 9 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. อาหารและเครื่องดื่ม
2. สิ่งทอ
3. ไม้
4. กระดาษ
5. เคมี
6. อโลหะ

7. โลหะขึ้นพื้นฐาน
8. ผลิตภัณฑ์โลหะ
9. อื่นๆ (เครื่องประดับ , อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น)

ปริมาณการใช้พลังงานโดยภาพรวมของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แสดงดังรูปด้านล่าง โดยที่อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องเค็ม มีการใช้พลังงานมากที่สุด และเป็นพลังงานหมุนเวียนเป็นส่วนใหญ่ อุตสาหกรรมอลูมิเนียมมีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับสอง แต่ถ้าไม่รวมพลังงานหมุนเวียน อลูมิเนียมเป็นประเภทอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 1.105 ปริมาณการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

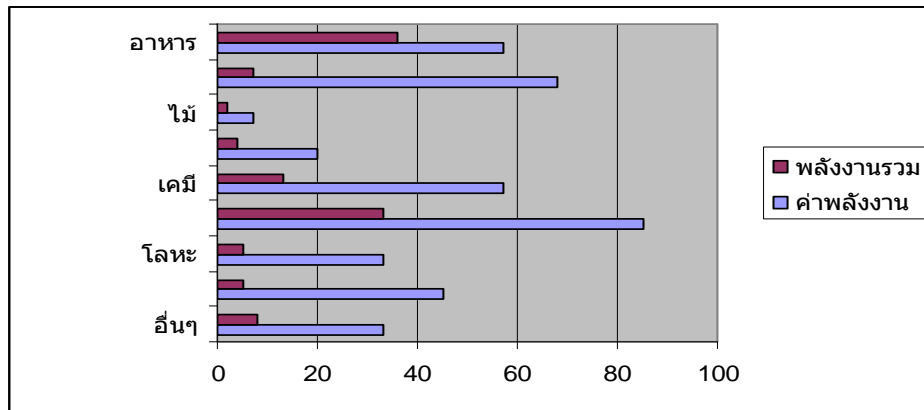
ตารางที่ 1.7 แสดงสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ แบ่งตามการใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้า

อุตสาหกรรม	ความร้อน (%)	ไฟฟ้า (%)
อาหาร	92	8
สิ่งทอ	31	69
ไม้	94	6
กระดาษ	78	22
เคมี	96	4
อลูมิเนียม	95	5
โลหะพื้นฐาน	35	65
ผลิตภัณฑ์โลหะ	5	95
อื่นๆ	50	50

ที่มา: Report on possibility for the energy conservation model projects in Thailand, ECCT, 1999

การใช้พลังงานในโรงงานจะอยู่ในรูปพลังงานความร้อนและไฟฟ้า สัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม

จากตารางจะเห็นว่าโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้พลังงานความร้อนเป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามควรให้ความสำคัญกับพลังงานไฟฟ้าเช่นกันเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีราคาแพงที่สุด ดังแสดงได้ดังรูปด้านล่าง ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอและโลหะมีปริมาณการใช้พลังงานรวมไม่มาก แต่อุตสาหกรรมเหล่านี้ใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าพลังงานความร้อน ทำให้มีค่าใช้จ่าย พลังงานสูง



รูปที่ 1.106 ค่าใช้จ่ายพลังงานของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

## 1.4 โครงสร้างค่าไฟฟ้า ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต ( Ft ) ( Electric tariff , Power Factor , Fuel Cost Adjustment Factor )

### 1.4.1 โครงสร้างค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้า ถือเป็นต้นทุนสำคัญที่สุดในการประกอบกิจการ โรงแรม การลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลง จึงเป็นการเพิ่มกำไรโดยตรงในการประกอบการ ดังนั้นก่อนที่จะวางแผนอนุรักษ์พลังงานด้านอื่นในโรงแรม ผู้บริหารหรือผู้รับผิดชอบด้านพลังงานควรวางแผนจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในโรงแรมก่อน เนื่องจากการจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า จะนำไปสู่การ วางแผนและควบคุมการใช้เครื่องจักรอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสงสว่างอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าให้น้อยที่สุด และก่อนที่จะทำการวางแผนจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า ควรจะทำความเข้าใจหลักการคิดคำนวณค่าไฟฟ้า ดังนี้

#### 1.4.1.1 ประเภทของอัตราค่าไฟฟ้า

ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 7 ประเภท ตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าได้แก่

- 1) บ้านอยู่อาศัย
- 2) กิจการขนาดเล็ก
- 3) กิจการขนาดกลาง
- 4) กิจการขนาดใหญ่
- 5) กิจการเฉพาะอย่าง
- 6) ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร
- 7) สูบน้ำเพื่อการเกษตร

**ประเภทที่ 3 : กิจการขนาดกลาง**

กิจการขนาดกลางคือกิจการที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดตั้งแต่ 30 ถึง 999 กิโลวัตต์ และมีปริมาณการใช้พลังงานงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน ไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว

**อัตราค่าไฟฟ้าปกติ**

	ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย
3.1.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	175.70	1.6660
3.1.2 แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	196.26	1.7034
3.1.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	221.50	1.7314

**อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff: TOU Tariff)**

	ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย		ค่าบริการ บาท/เดือน
	1*	1*	2*	
3.2.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์	74.14	2.6136	1.1726	228.17
3.2.2 แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	132.93	2.6950	1.1914	228.17
3.2.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	210.00	2.8408	1.2246	228.17

- 1\* On Peak : เวลา 09.00 – 22.00 น. วันจันทร์ – วันศุกร์  
 2\* Off Peak : เวลา 22.00 – 09.00 น. วันจันทร์ – วันศุกร์  
 : เวลา 00.00 – 24.00 น. วันเสาร์ - วันอาทิตย์ และ  
 วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)

**ประเภทที่ 4: กิจการขนาดใหญ่**

กิจการขนาดใหญ่คือกิจการที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด ตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน เกินกว่า 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว

**อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of Day Tariff: TOD Tariff)**

ประเภท	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์			ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย
	1*	2*	3*	
4.1.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	224.30	29.91	0	1.6660
4.1.2 แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	285.05	58.88	0	1.7034
4.1.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	332.71	68.22	0	1.7314

- 1\* On Peak : เวลา 18.30-21.30 น. ของทุกวัน
- 2\* Partial Peak : เวลา 08.00-18.30 น. ของทุกวัน  
คิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่เกินจากช่วง On Peak
- 3\* Off Peak : เวลา 21.30-08.00 น. ของทุกวัน ไม่คิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า

**อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff: TOU Tariff)**

ประเภท	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้าบาท/ หน่วย		ค่าบริการ บาท/เดือน
		1*	2*	
4.2.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์	74.14	2.6136	1.1726	228.17
4.2.2 แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	132.93	2.6950	1.1914	228.17
4.2.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	210.00	2.8408	1.2246	228.17

- 1\* On Peak : เวลา 09.00 - 22.00 น. วันจันทร์ – วันศุกร์
- 2\* Off Peak : เวลา 22.00 - 09.00 น. วันจันทร์ – วันศุกร์  
: เวลา 00.00 - 24.00 น. วันเสาร์ - วันอาทิตย์ และ  
วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)

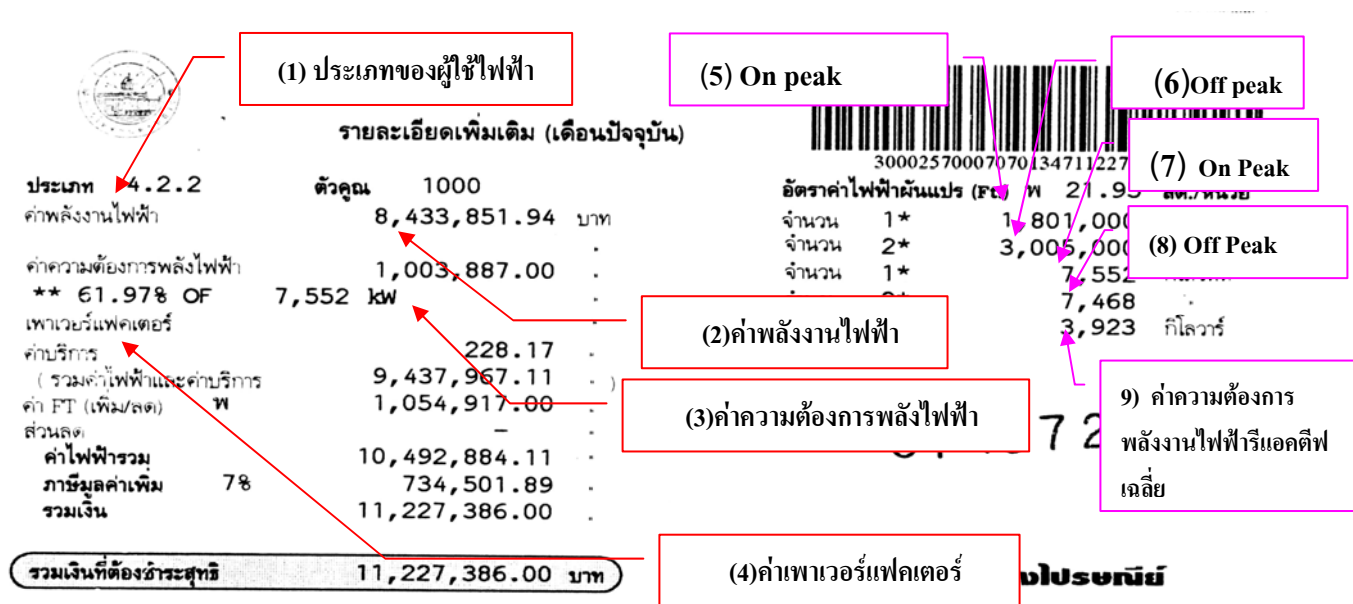
**หมายเหตุ**

1. ผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในอัตราประเภท 4.1 (TOD Rate เดิม) ซึ่งขอใช้ไฟฟ้าก่อนเดือนตุลาคม 2543 จะถูกจัดอยู่ในอัตราประเภท 4.1 (TOD Tariff ใหม่)
2. ผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในอัตราประเภท 4.2 (TOU Rate เดิม) ซึ่งขอใช้ไฟฟ้าก่อนเดือนตุลาคม 2543 จะถูกจัดอยู่ในอัตราประเภท 4.2 (TOU Tariff ใหม่)
3. ผู้ขอใช้ไฟฟ้ายาใหม่ที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไปหรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน เกินกว่า 250,000 หน่วยต่อเดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2543 เป็นต้นไป จะจัดเข้าอยู่ในอัตราประเภท 4.2 ในเดือนถัดไปหลังจากเดือนที่ติดตั้งเครื่องวัดฯ TOU แล้ว ในช่วงที่ยังไม่ได้ติดตั้งเครื่องวัดฯ TOU อนุโลมให้คิดค่าไฟฟ้าตามอัตราประเภท 3.1 ไปพลางก่อน

4. ผู้ขอใช้ไฟฟ้าในอัตราประเภท 4.1 สามารถเลือกใช้อัตราประเภท 4.2 ได้ โดยจะต้องแจ้งความประสงค์กับการไฟฟ้านครหลวงก่อน และจะต้องชำระค่าเครื่องวัดฯ TOU ทั้งนี้หากเลือกใช้แล้วจะกลับไปใช้อัตราเดิมอีกไม่ได้ แม้ว่าต่อมาจะมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดต่ำกว่า 1,000 กิโลวัตต์ และมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือนก็ตามนอกจากจะมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ ติดต่อกันเป็นเวลา 12 เดือน หรือได้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้ไฟฟ้า

5. ผู้ขอใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ ติดต่อกันเป็นเวลา 12 เดือน ในเดือนถัดไปจะจัดเข้าอยู่ในประเภทที่ 2 หรือกรณีที่ประเภทที่ 6.1 แล้วแต่กรณี

### 1.4.2 ตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า



รูปที่ 1.108 ตัวอย่างค่าใช้จ่ายไฟฟ้า

#### 1.4.2.1 ส่วนประกอบของค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้าคิดคำนวณจากส่วนประกอบของค่าไฟ ซึ่งมีทั้งส่วนที่สามารถควบคุมได้ คือ

- (1) ค่าพลังงานไฟฟ้า (2)
- (2) ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (3)
- (3) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (4)

และส่วนที่ไม่สามารถควบคุมได้ คือ

- (1) ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (ค่า F<sub>1</sub>)
- (2) ค่าบริการ
- (3) ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม (ขึ้นอยู่กับค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมดในแต่ละเดือน)

การลดค่าไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาบริหารจัดการส่วนประกอบของค่าไฟที่สามารถควบคุมได้ดังต่อไปนี้ (ดูตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟประกอบ)

(1) ค่าพลังงานไฟฟ้า (2)

คือค่าธรรมเนียม (บาท) ที่คิดจากจำนวนความต้องการพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งเดือนคูณด้วยค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราที่แตกต่างกันตามประเภทผู้ใช้ไฟ (1)

(2) ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (3)

คือ ค่าธรรมเนียม (บาท) ที่คิดจากอัตราค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (ตามประเภทของผู้ใช้) คูณด้วยจำนวนความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand :7) ที่ตรวจวัดได้ในทุกช่วง 15 นาทีระหว่างเวลา On Peak ของรอบเดือนนั้น โดยจะตรวจวัด 4 ครั้งในทุกชั่วโมงตลอดเดือน แต่จะคิดค่าไฟฟ้าจากจำนวนความต้องการไฟฟ้าที่สูงสุดในรอบเดือนเท่านั้น หากจำนวนความต้องการไฟฟ้ามิเศษไม่ถึง 0.5 กิโลวัตต์จะตัดเศษทิ้ง แต่หากจำนวนความต้องการไฟฟ้ามิเศษตั้งแต่ 0.5 กิโลวัตต์ขึ้นไป คิดเป็น 1 กิโลวัตต์

(3) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (4)

คือค่าธรรมเนียม(บาท)ที่คิดจากค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ (8) หากเกินกว่าร้อยละ 61.97 ของปริมาณความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand:7) จะต้องเสียค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในอัตรากิโลวาร์ละ 14.02 บาท เศษของกิโลวาร์ ถ้าไม่ถึง 0.5 กิโลวาร์ตัดทิ้ง เศษตั้งแต่ 0.5 กิโลวาร์ขึ้นไป คิดเป็น 1 กิโลวาร์ ในกรณีตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้าข้างต้น ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ เท่ากับ 3,923 กิโลวาร์ ซึ่งไม่เกินร้อยละ 61.97 ของปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้า (61.97% ของ 7,552 kW เท่ากับ 4,679.97) จึงไม่เสียค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

ราคาค่าไฟฟ้าเกิดขึ้นจากหลายองค์ประกอบ ซึ่งเกี่ยวกับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าความต้องการกำลัง(พลัง)ไฟฟ้าสูงสุด ก่อนที่จะลดค่าไฟฟ้าให้ต่ำที่สุด

ราคาค่าไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดตั้งแต่ 30 kW ขึ้นไปแต่ไม่เกิน 2000 kW ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าจะอยู่ในประเภทที่ 3 หรือเกิน 1000 kW ในประเภทที่ 4 ตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้า ใบเสร็จค่าไฟฟ้าจะกำหนดให้มีการชำระเป็นรายเดือน โดยจะมีการระบุถึงองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนหลักดังนี้

- (1) ราคาพลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์-ชม.)
- (2) ราคาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (บาท/กิโลวัตต์/เดือน)
- (3) ราคาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จะต้องจ่าย

ราคาค่าใช้จ่ายขององค์ประกอบดังกล่าวจะผันแปร ขึ้นอยู่กับ

- (1) ระดับของแรงดันที่จ่าย
- (2) ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า
- (3) ปริมาณความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด
- (4) วันและเวลาที่ใช้

ราคาค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด

- (1) มีหน่วยเป็นบาท/กิโลวัตต์ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 74.14 บาท/กิโลวัตต์ ถึง 221.5 บาท/กิโลวัตต์ ตามประเภทผู้ใช้และระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย
- (2) ค่านี้เป็นค่าใช้จ่ายสำหรับเงินลงทุนซื้อและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และก่อสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้า
- (3) ค่านี้ขึ้นอยู่กับความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับเดือนนั้นๆ

ราคาค่าพลังงานไฟฟ้า

- (1) มีหน่วยเป็นบาท/กิโลวัตต์-ชม. โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 1.666 บาท/กิโลวัตต์-ชม. ถึง 1.7314 บาท/กิโลวัตต์-ชม. ตามประเภทผู้ใช้และระดับแรงดันที่จ่าย
- (2) ค่านี้เป็นการจ่ายสำหรับค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า
- (3) ขึ้นอยู่กับกิโลวัตต์-ชม. ที่ใช้ใน 1 เดือน

ราคาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (ค่าปรับเมื่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ)

- (1) ใช้กับโรงงานที่มีค่ากิโลวาร์ (kVAr) เกิน 61.97 % ของค่าความต้องการพลังไฟฟ้ากิโลวัตต์สูงสุดในเดือนนั้น
- (2) ราคา 14.02 บาท/กิโลวาร์ ที่เกินต่อเดือน

ราคาทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม

### 1.4.3 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จะมีผลต่อการสูญเสียภายในระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้าซึ่งจะช่วยทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงได้ หากค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 ระบบไฟฟ้าที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำก็จะมีผลสูญเสียภายในระบบมาก อุปกรณ์ที่ใช้ก็จะต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางก็ต้องเสียเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่าไฟฟ้าที่เสียก็ต้องมากขึ้นด้วย ดังนั้นการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้สูงขึ้นจึงมีความจำเป็น อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาถึงเงินลงทุน กับค่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เทียบกับค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้จากการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์

ในการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ โดยทั่วไปจะไม่ยุ่งยากมากนัก ยกเว้นในบางระบบที่จะต้องมีการพิจารณาให้ละเอียดถี่ถ้วน มิเช่นนั้นแล้วแทนที่จะได้ผลดี อาจมีผลเสียต่ออุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าระบบเดียวกันเสียหายได้ เช่นการเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบที่มีการใช้อุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบนี้จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ดังนั้นการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปเพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์อาจทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้เมื่อเกิดสภาวะเรโซแนนซ์

#### 1.4.3.1 การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

อุปกรณ์ที่นำมาต่อใช้งานกับระบบไฟฟ้า จะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ตัวมัน 2 ลักษณะคือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ กับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปโดยไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่นการสูญเสียในรูปของความร้อน การสูญเสียกำลังไฟฟ้างดงกล่าวนี้ ส่วนมากแล้วจะ

เกิดขึ้นกับโหลดที่จ่ายไฟให้แล้วทำให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นมา ซึ่งก็คือโหลดจำพวกขดลวดตัวนำ หรือเรียกอีกอย่างว่าอินดักทีฟโหลด (Inductive load) เช่น มอเตอร์ บัลลาสต์ที่ใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

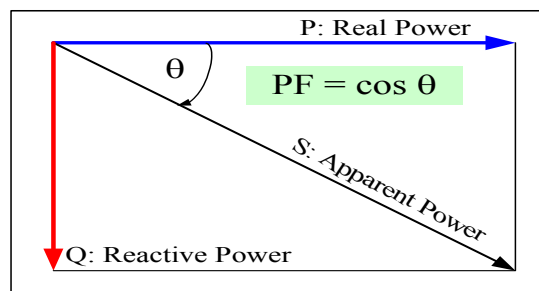
### 1.4.3.2 เพาเวอร์แฟกเตอร์คืออะไร

ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ สามารถแยกประเภทของกำลังไฟฟ้าได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรหรือโหลด เป็นกำลังไฟฟ้าที่คำนวณมาจากการถอดรากที่สองของ  $P^2 + Q^2$  จึงเรียกกำลังไฟฟ้าแบบนี้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Apparent power) หรือค่า S มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์ (VA)

2. กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือเรียกกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) หรือ ค่า P หาได้จากสูตร  $EI \cos \theta$  มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

3. กำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป (Reactive power) หรือค่า Q หาได้จากสูตร  $EI \sin \theta$  มีหน่วยเป็นโวลต์แอมป์รีแอกทีฟหรืออาร์ (VAR) และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของ 3 แบบ แสดงไว้ในรูปที่ 1.108



รูปที่ 1.108 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

สมมติว่ามีบ้านอยู่ 2 หลัง แต่ละหลังใช้กำลังไฟฟ้าไป 1000 วัตต์เท่ากัน โดยบ้านหลังแรกใช้กระแสไฟฟ้า 4.17 แอมป์แอมป์ ที่แรงดัน 240 โวลต์ เมื่อนำมาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ได้ 1000 วัตต์พอดี นั่นคือ  $\cos \theta = 1$  หรือมุม  $\theta = 0$  องศา บ้านหลังที่ 2 ใช้กระแสไฟฟ้า 8.33 แอมป์แอมป์ ที่แรงดัน 240 โวลต์เช่นกัน เมื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง ปรากฏว่าได้ 1000 วัตต์เหมือนกัน นั่นคือค่า  $\cos \theta = 0.5$  หรือ  $\theta = 45$  องศา

จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงกล่าวได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้งานไปของบ้านทั้ง 2 หลังมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งบ้านหลังที่สองจะมีค่ามากกว่าของบ้านหลังแรก ทั้งๆ ที่กำลังไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้งานมีค่าเท่ากัน ดังนั้นแสดงว่าบ้านหลังที่สองมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปส่วนหนึ่ง เมื่อสังเกตดูจากตัวเลขที่นำมาคำนวณ

ดูแล้ว กำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้เกิดจากค่า  $\cos \theta$  ซึ่งค่ามุม ก็คือมุมระหว่างแรงดัน กับ กระแสในสาย โดยมีลักษณะกระแสเกิดขึ้นล่าหลังแรงดัน หรือกระแสเกิดก่อนแรงดัน และนี่แหละคือ ความหมายของ “เพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF)”

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดคือค่าที่แสดงว่าผู้ใช้ไฟฟ้า มีการใช้ไฟฟ้าอย่างไร ทั้งสองค่านี้มีผลต่อค่าไฟฟ้าของท่านการปรับปรุงคุณลักษณะ ของทั้งสองค่าจะช่วยลด ค่าไฟฟ้าของท่านได้

“ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า” เป็นตัวแสดงถึงการ ใช้ไฟฟ้าของท่านมีประสิทธิภาพ เพียงใด และสามารถวัดได้โดยใช้มาตรวัดชนิดพิเศษ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 และ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จั่วแต่ คือค่าที่ต่ำกว่า 0.85 การไฟฟ้าจะคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับ ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ใช้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 0.85 หากเราสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น ได้ก็จะไม่เสียค่า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะให้ผล ตอบแทนที่คุ้มค่ากับการลงทุน

ความต้องการพลังไฟฟ้า เป็นองค์ประกอบหนึ่งของค่าไฟฟ้าของท่าน คิดจากโหลด ของ ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดใน โรงงานของท่าน โดยคำนวณจากค่าพลังไฟฟ้าเฉลี่ย 15 นาทีในเดือนนั้น เราสามารถที่จะวัดและควบคุมค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเพื่อลดค่าใช้จ่ายให้ต่ำที่สุด ด้วยการปรับปรุง ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าควบคู่กับการควบคุมความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อธุรกิจ ของท่านดังนี้คือ

- 1) ลดต้นทุนค่าไฟฟ้าให้น้อยลง หรือเป็นการเพิ่มกำไร
- 2) เพิ่มขนาดการใช้งานของสายไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนมาก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอเตอร์ พัดลม ปั้มน้ำ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ฯลฯ ต่างต้องการทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในการทำงาน ดังนั้น อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จึงมักมีค่า P.F เป็นแบบตามหลังอุปกรณ์ที่สามารถให้กำลังไฟฟารีแอกทีฟ เพื่อปรับปรุงค่า P.F. ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ หรือ Synchronous Motor

(1) คาปาซิเตอร์หรือ ตัวเก็บประจุ

เป็นอุปกรณ์ที่จัดหาได้ง่ายที่สุดและถูกที่สุดซึ่งในการปรับปรุงค่า P.F. ตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยโลหะ 2 ชั้น คั่นด้วยฉนวนไฟฟ้า ตามปกติแล้วโลหะจะเป็นสังกะสีและอลูมิเนียม ส่วน ฉนวนไฟฟ้าจะใช้กระดาษหรือโพลีโพรโพลีน หรือทั้งสองอย่างแล้วม้วนให้มีรูปร่างเป็นขด และบรรจุใน ภาชนะที่ปิดผนึกไว้ด้วยอากาศ ก๊าซหรือน้ำมัน

(2) ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor )

สามารถใช้ปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ แต่มีราคาแพงและค่าบำรุงรักษาสูงเราใช้งาน สำหรับการติดตั้งขนาดใหญ่ประมาณ 1,000 กิโลวัตขึ้นไป

### 1.4.3.3 วิธีการคำนวณเพื่อปรับปรุง P.F.

การปรับปรุง P.F. ให้สูงขึ้น ใช้ คาปาซิเตอร์ ต่อขนานเข้ากับโหลดเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอกตีฟให้แก่โหลด

\* ข้อสังเกต โหลดยังคงใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากัน ทั้งในกรณีก่อนและหลังการปรับปรุง P.F. กระแสใช้งาน ( 80 A ) และกระแสจินตภาพ(60A) เพียงแต่หลังการปรับปรุง P.F. แล้ว ขนาดกระแสไฟฟ้ารวมที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องจ่ายให้แก่โหลดจะลดลงจาก 100 A เหลือ 80 A

หากกำหนดให้ P.F. เดิมมีค่า  $\cos\phi_1$  และ P.F. ใหม่ที่ต้องการมีค่า  $\cos\phi_2$  โดย  $\phi_1 < \phi_2$  จะได้

$$\text{kVA}_r (\text{เดิม}) = \text{kW} \tan\phi_1$$

$$\text{kVA}_r (\text{ใหม่}) = \text{kW} \tan\phi_2$$

$$\text{kVA}_r \text{ ที่ต้องใช้} = \text{kW} (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

**ตัวอย่าง 1.19** โรงงานแห่งหนึ่งมีโหลด 400 kW มีค่า P.F. 77% Lagging หากต้องการปรับปรุง P.F. เป็น 90% Lagging

$$\text{วิธีทำ} \quad - \text{P.F. (เดิม)} = 77\% = \cos\phi_1$$

$$\therefore \phi_1 = 39.7^\circ$$

$$- \text{P.F. (ใหม่)} = 90\% = \cos\phi_2$$

$$\therefore \phi_2 = 25.8^\circ$$

$$\therefore \text{ขนาด คาปาเตอร์ (kVA}_r) = 400(\tan 39.7^\circ - \tan 25.8^\circ)$$

$$= 400(0.344)$$

$$= 135.2 \text{ kVA}_r$$

ทั้งนี้ ตารางการหาค่าตัวคูณ  $(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$  จากการปรับปรุงค่า P.F. สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ตารางการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ( $\tan\phi_1 - \tan\phi_2$ )

ค่า P.F. ก่อนปรับปรุง	ค่า P.F. ที่ต้องการปรับปรุง																				
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.50	0.982	1.008	1.034	1.060	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.306	1.337	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.590	1.732
0.51	0.937	0.963	0.989	1.015	1.041	1.067	1.093	1.120	1.147	1.174	1.202	1.231	1.261	1.291	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.687
0.52	0.893	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.049	1.076	1.103	1.130	1.158	1.187	1.217	1.247	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	0.850	0.876	0.902	0.928	0.954	0.980	1.007	1.033	1.060	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600
0.54	0.809	0.835	0.861	0.887	0.913	0.939	0.965	0.992	1.019	1.046	1.074	1.103	1.133	1.163	1.196	1.230	1.267	1.308	1.356	1.416	1.559
0.55	0.768	0.794	0.820	0.846	0.873	0.899	0.925	0.952	0.979	1.006	1.034	1.063	1.092	1.123	1.155	1.190	1.227	1.268	1.315	1.376	1.518
0.56	0.729	0.755	0.781	0.807	0.834	0.860	0.886	0.913	0.940	0.967	0.995	1.024	1.053	1.084	1.116	1.151	1.188	1.229	1.276	1.337	1.497
0.57	0.691	0.717	0.743	0.769	0.796	0.822	0.848	0.875	0.902	0.929	0.957	0.986	1.015	1.046	1.078	1.113	1.150	1.191	1.238	1.299	1.441
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.811	0.839	0.865	0.892	0.920	0.949	0.979	1.009	1.042	1.076	1.113	1.154	1.201	1.262	1.405
0.59	0.618	0.644	0.670	0.696	0.723	0.749	0.775	0.802	0.829	0.856	0.884	0.913	0.942	0.973	1.005	1.040	1.077	1.118	1.165	1.226	1.368
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.714	0.740	0.767	0.794	0.821	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.541	0.567	0.593	0.620	0.646	0.672	0.699	0.726	0.753	0.781	0.810	0.839	0.870	0.902	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.639	0.666	0.693	0.720	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.477	0.503	0.529	0.555	0.581	0.607	0.634	0.661	0.688	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.997	1.058	1.201
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.519	0.545	0.572	0.599	0.626	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.385	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.459	0.485	0.512	0.539	0.566	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.906	1.049
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.401	0.427	0.454	0.481	0.508	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.398	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.370	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.317	0.343	0.370	0.397	0.424	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.289	0.316	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.263	0.290	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.151	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82			0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698	0.841
0.83				0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672	0.815
0.84					0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646	0.789
0.85						0.026	0.053	0.080	0.107	0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620	0.763
0.86							0.027	0.054	0.081	0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593	0.736
0.87								0.027	0.054	0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567	0.710
0.88									0.027	0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540	0.683
0.89										0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.513	0.656
0.90											0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.485	0.628
0.91												0.030	0.060	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456	0.600
0.92													0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426	0.570
0.93														0.032	0.067	0.104	0.145	0.192	0.253	0.396	0.540
0.94															0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363	0.507
0.95																0.037	0.078	0.126	0.186	0.329	0.473
0.96																	0.041	0.089	0.149	0.292	0.436
0.97																		0.048	0.108	0.251	0.395
0.98																			0.061	0.203	0.347
0.99																				0.061	0.203
																					0.000

1.4.4 ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต ( Ft )

ค่า Ft คือค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ มีค่าเป็นสตางค์ต่อหน่วยเป็นค่า ไฟฟ้าผันแปรที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทุก ๆ 4 เดือน ซึ่งจะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายที่ การไฟฟ้าฯ ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผน ผลกระทบของอัตราแลกเปลี่ยน (FOREX) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผน และอัตราเงินเฟ้อ เป็นต้น โดยค่า Ft จะแยกตามกิจการ ได้แก่ กิจการผลิต กิจการระบบส่ง กิจการระบบจำหน่าย และกิจการค้าปลีก

การคิดเงินค่า Ft จำนวนจากจำนวนหน่วยที่ใช้ คูณด้วยราคา Ft ต่อหน่วยของเดือน นั้น ๆ ค่า Ft ที่เรียกเก็บในแต่ละเดือนจะเรียกเก็บกับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกประเภทและทุกหน่วยของการใช้ไฟฟ้าเดียวกัน โดยการไฟฟ้าจะแสดงราคา Ft เป็นสตางค์ต่อหน่วย และจำนวนเงินค่า Ft เป็นบาท ไว้ในใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้า

การกำหนดค่า Ft คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพข.) ซึ่งมี ฯพณฯ นายกรัฐมนตรี เป็นประธานได้อนุมัติให้นำสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติมาใช้ ตั้งแต่การ

ปรับปรุงโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าฐานเมื่อ 1 ธันวาคม 2534 โดยมีผลตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2534 และได้กำหนดให้คณะกรรมการพิจารณาโยบายพลังงาน (กพง.) ซึ่งมีรัฐมนตรีประจำสำนักนายกรัฐมนตรี เป็นประธาน ทำหน้าที่ควบคุมดูแล ซึ่งได้มีการแต่งตั้งคณะกรรมการกำกับสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ประกอบด้วยผู้แทนจาก สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง กรมบัญชีกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย หอการค้าไทย สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีหน้าที่กำกับดูแลการกำหนด วิธีการคำนวณและให้ความเห็นชอบการคำนวณค่า  $F_1$  ตามสูตรที่ได้รับความเห็นชอบจาก กพง. เป็นประจำทุกเดือน และเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2539 คณะกรรมการพิจารณาโยบายพลังงาน (กพง.) ได้มีมติเห็นชอบให้มีการปรับค่า  $F_1$  4 เดือนต่อครั้ง เพื่อมิให้มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยจนเกินไป ทำให้ผู้ประกอบการสามารถวางแผนการผลิต การจำหน่ายสินค้า และการบริการได้ง่ายขึ้น

## 1.5 ตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าแบบต่างๆ และการควบคุมค่าไฟฟ้า ( Calculation of electricity cost and control of electricity cost )

### 1.5.1 ตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าแบบต่างๆ

#### 1.5.1.1 อัตราปกติ

<b>ข้อมูล</b>	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	3.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	12 kV
	ความต้องการพลังไฟฟ้า	205 kW
	พลังงานไฟฟ้า	48,800 kWh
	ความต้องการพลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	250 kVAr
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2543

การคำนวณ	
1. ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า	= $205 \times 196.26$
	= 40,233.30 บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	= $48,800 \times 1.7034$
	= 83,125.92 บาท
4. ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	= จำนวน kVAr ที่เกินกว่า 61.97% ของ kW Demand
	= $250 - 0.6197 \times 205 = 123$
	$123 \times 14.02 = 1,724.46$ บาท

**ตอนที่ 2 บทที่ 1** ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Fi)	=48,800 x 0.00
	=0.00 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	= 40,233.30 + 83,125.92 + 1,724.46 + 0.00
	=125,083.68 บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	=125,083.68 x 0.07
	=8,755.86 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	=125,083.68 + 8,755.86
	=133,839.54 บาท

**1.5.1.2 อัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD)**

<b>ข้อมูล</b>	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	4.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	22kV
	<b>ความต้องการพลังงานไฟฟ้า</b>	
	ช่วง ON PEAK	1,460 kW
	ช่วง PARTIAL PEAK	1,575 kW
	ช่วง OFF PEAK	1,420 kW
	พลังงานไฟฟ้า	978,000 kWh
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Fi)	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2543

<b>การคำนวณ</b>	
1. ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	(1,460 x 285.05) + [(1,575 – 1,460) x 58.88]
	=422,944.20 บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	=978,000 x 1.7034
	=1,665,925.20 บาท
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Fi)	=978,000 x 0.00
	=0.00 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	=422.944.20 + 1,665,925.20 +0.00
	=2,088,869.40 บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	=2,088,869.40 x 0.07
	=146,220.86 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	=2,088,869.40 + 146,220.86
	=2,235,090.26 บาท

### 1.5.1.3 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

ข้อมูล	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	4.2		
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	24 kV		
	ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้า	ความต้องการพลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)	
	09:00 – 22:00 น. วันจันทร์ - ศุกร์	7,500	1,638,000	
	22:00 – 09:00 น. วันจันทร์ – ศุกร์ และ 00:00 – 24:00 น. วันเสาร์ – อาทิตย์ และ วันหยุดตามราชการปกติ	6,400	2,104,600	
	ความต้องการพลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	2,700 kVAr		
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh		
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2543		
	<b>การคำนวณ</b>			
	1. ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า	=7,500 x 132.93 =996,975.00 บาท		
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	=(1,638,000 x 2.6950) + (2,104,600 x 1.1914) =6,921,830.44 บาท			
3. ค่าบริการ	=228.17 บาท			
4. ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	=จำนวน kVAr ที่เกินกว่า 61.97% ของ kW =2,700 – 0.6197 x 7,500 = 0.00			
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Fi)	=(1,638,000 + 2,104,600) x 0.00 =0.00 บาท			
รวมเงินค่าไฟฟ้า	=996,975.00 + 6,921,830.44 + 228.17 + 0.00 + 0.00 =7,919,033.61 บาท			
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	=7,919,033.61 x 0.07 =554,332.35 บาท			
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	=7,919,033.61 + 554,332.35 =8,473,365.96 บาท			

## 1.5.2 การควบคุมค่าไฟฟ้า

แนวทางในการลดค่าไฟฟ้าเบื้องต้นนี้ จะเป็นแนวทางที่อ้างอิงตามรูปแบบอัตราค่าไฟฟ้าในหัวข้อที่ 1.4

### กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราปกติ (อัตราค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน)

คือ เสียเฉพาะค่าพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากค่าไฟฟ้ามีเฉพาะส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวการลดค่าไฟฟ้าจะทำให้จึงต้องอาศัยหลักการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสียการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า

- ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพิ่มให้สูงขึ้น ได้โดยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง  
- ประสิทธิภาพของการใช้งานเพิ่มให้สูงขึ้น ได้ โดยการเปิดใช้งานที่จำเป็น และใช้งานอย่างเหมาะสม ตัวอย่าง เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในระบบแสงสว่างทำได้โดย

1. เลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง (หลอดที่ให้ค่าลูเมนต่อวัตต์สูง)
2. เลือกใช้อุปกรณ์ประกอบวงจร เช่น บัลลาสต์ที่มีการสูญเสียต่ำ (บัลลาสต์กำลังสูญเสียต่ำ หรือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์)
3. เลือกใช้โคมไฟที่มีประสิทธิภาพสูง มีการกระจายแสงในทิศทางที่เหมาะสม
4. ประยุกต์ใช้แสงอาทิตย์ตามความเหมาะสม เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวัน
5. ปรับสภาพแวดล้อมในพื้นที่ให้ดีขึ้น โดยการเลือกใช้วัสดุตกแต่งอาคารที่มีสีสว่างสะท้อนแสงได้ดีขึ้น
6. ให้แสงสว่างในระดับที่พอเหมาะตามที่มาตรฐานการส่องแสงสว่างกำหนด
7. มีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อลดการสูญเสียของแสงสว่างจากผลของความสกปรก และการเสื่อมสภาพ

8. มีระบบการควบคุมการเปิด-ปิด ใช้งานที่เหมาะสมโดยอาจใช้วิธีการ เปิด-ปิด หลายๆ วิธีผสมผสานกัน เช่น อาจมีการใช้เครื่องตั้งเวลา สวิตซ์แสง ระบบควบคุมอัตโนมัติ เป็นต้น

### กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราปกติ (อัตราค่าไฟฟ้าแบบ 2 ส่วน)

เนื่องจากค่าไฟฟ้าประกอบด้วย ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้า โดยค่าไฟฟ้าทั้งสองส่วนนี้เป็นแบบอัตราคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้งาน ดังนั้นแนวทางการลดค่าไฟฟ้าจึงต้องดำเนินการ 2 แนวทาง คือ

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน
2. ใช้ไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะก่อให้เกิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (Demand Charge) สูง ซึ่งทำได้โดยการหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องจักร อุปกรณ์ พร้อมๆ กันในเวลาเดียวกัน

ความต้องการพลังไฟฟ้าทุกๆ 1 กิโลวัตต์ที่เพิ่มขึ้น อาจจะต้องเสียค่าไฟเพิ่มขึ้นอีก 196.26 บาท บวก VAT อีก 7% (210 บาทต่อกิโลวัตต์)

### กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD)

ผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้ จะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าในอัตราคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่จะเสียค่าความต้องการพลังไฟฟ้าโดยขึ้นกับช่วงเวลาของวัน กล่าวคือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าในช่วง 18:00 น. – 21:30น. จะมีราคาแพงที่สุด แต่ในช่วงเวลา 21:30 น. – 08:00 น. ไม่ต้องเสียค่าความต้องการพลังไฟฟ้า ดังนั้น แนวทางการลดค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้สามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง ดังนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้ากลุ่ม 1 ส่วน
  2. หลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าแพง คือ ช่วง 18:00 น. – 21:30น. ของทุกวัน และเพิ่มการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าความต้องการพลังไฟฟ้าถูกหรือไม่ต้องเสียค่าความต้องการพลังไฟฟ้า คือ ช่วงเวลา 21:30 น. – 08:00 น. ของทุกวัน ในช่วงเวลาที่ต้องเสียค่าความต้องการไฟฟ้า จะต้องใช้ไฟอย่างสม่ำเสมอ ด้วยการหลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีค่าความต้องการไฟฟ้าแพงอาจทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้
    - ย้ายโหลดไปเดินในช่วงเวลาอื่นแทน
    - ปั่นไฟใช้เอง เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าฯ
    - หากเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าที่ทำงานเพียงวันละ 2 กะ ให้แยกเวลาทำงานระหว่างกะ ตอนช่วงเวลา 18:00 น. ถึง 21:30น.แทน
    - ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแทนระบบปกติ เช่น ใช้ระบบปรับอากาศแบบ Ice Storage เพื่อผลิตน้ำแข็งตอนกลางคืน แล้วดึงความเย็นไปใช้ตอนกลางวัน หรือผลิตน้ำแข็งตอนกลางวัน แล้วดึงความเย็นไปใช้ตอนหัวค่ำ เป็นต้น

### กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

ผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้ จะเสียค่าความต้องการไฟฟ้าในอัตราคงที่ โดยคิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเฉพาะความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างเวลา 09:00 น. – 22:00น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์เท่านั้น ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้านั้น จะเสียในอัตราตามช่วงเวลาของการใช้กล่าวคือ หากใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลา 09:00 น. – 22:00น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์จะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าแพงสุด โดยการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางคืนของวันจันทร์ถึงวันศุกร์ระหว่างเวลา 22:00 น. – 09:00น. และวันเสาร์ - อาทิตย์และวันหยุดราชการตามปกติทั้งวันจะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าถูกกว่า ดังนั้นผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้จึงควรใช้แนวทางการลดค่าไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน
2. การใช้ไฟฟ้าในช่วงที่ต้องเสียค่าความต้องการพลังไฟฟ้า จะต้องใช้ไฟอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด สูงเกินควร
3. หลีกเลี่ยงหรือลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าแพง (ช่วง 09:00 น. – 22:00น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์)
4. ปรับกิจกรรมการทำงานใหม่ โดยเพิ่มกิจกรรมในช่วงกลางคืนถึงตอนเช้า (22:00 น. – 09:00น. ของจันทร์ถึงวันศุกร์) ให้มากขึ้น พร้อมทั้งเพิ่มกิจกรรมในวันเสาร์ – วันอาทิตย์ และวันหยุดราชการตามปกติ ซึ่งมีค่าพลังงานไฟฟ้าถูกเท่ากับช่วงกลางคืน

## สรุป

การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นมีแหล่งขึ้นได้ 7 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การเสียดสี (Friction) แรงกดดัน (Pressure) ความร้อน (Heat) แสงสว่าง (Light) ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Action) อำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) และปฏิกิริยา

การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมและขับนำสวิตช์ และวงจรทั้งหมดสามารถแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก เราเรียกว่า “วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง” วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำการแปลงผันพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมปริมาณขาออก เช่น ขนาดของแรงดันและความถี่ได้ โดยสะดวก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำงานที่ความถี่สูงจึงมีขนาดเล็กกะทัดรัดและเบา

ข้อเสียของอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็มี อาทิเช่น วงจรทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์และออกแบบแล้วยังมีปัญหาความเชื่อถือได้ของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ ตลอดจนปัญหาอันเนื่องมาจากการสวิตช์ ซึ่งได้แก่ การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI)

จากกฎของโอห์มซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า คือ

4. แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) สัญลักษณ์ V
5. กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) สัญลักษณ์ A
6. ความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) สัญลักษณ์  $\Omega$

กำลังไฟฟ้า หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ไปในการทำให้เกิดเป็นพลังงานรูปต่างๆเช่นพลังงานแสงสว่าง พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น โดยกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์(Watt:W)

พลังงานไฟฟ้า จะมีหน่วยเป็น “กิโลวัตต์-ชั่วโมง” (kilo Watt hour) หรือที่เรียกกันว่า “ยูนิต” (Unit) ค่าของพลังงานไฟฟ้าจะได้มาจากผลคูณของกำลังไฟฟ้า (Electric Power) ของเครื่องใช้ไฟฟ้ากับจำนวนระยะเวลาที่ใช้เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นๆ มีหน่วยเป็น “ชั่วโมง” (Hour)

พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า การวัดที่มีความเที่ยงตรงสูง ความเที่ยงตรงในที่นี้หมายถึงความถูกต้องและสามารถทำซ้ำได้ดี ความถูกต้องของการวัด หมายถึง ขนาดของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง ความสามารถในการทำซ้ำได้ หมายถึง ค่าอัตราส่วนของความไม่สม่ำเสมอของค่าที่วัดได้ที่แสดงเป็น % ซึ่งมี ความหมายเหมือนกับความเที่ยงตรง

## 1.6 กิจกรรม ( Activity )

- จงหาค่าของกำลังงานไฟฟ้าดังต่อไปนี้ โดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า ดังกล่าวเป็นระยะเวลา 1 เดือน จะต้องสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้ากี่ยูนิต และจะต้องเสียค่าไฟฟ้าจำนวนเท่าไร (ถ้าให้ค่าไฟฟ้า ยูนิตละ 2 บาท)
  - เตารีดไฟฟ้า 750 วัตต์ ใช้ 3 ชั่วโมงต่อวัน
  - หม้อหุงข้าวไฟฟ้า 600 วัตต์ ใช้ 1 ชั่วโมงต่อวัน
  - เตาไฟฟ้า 1,000 วัตต์ ใช้ 5 ชั่วโมงต่อวัน
  - พัดลม 100 วัตต์ ใช้ 10 ชั่วโมงต่อวัน
- ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือในการวัดสิ่งที่เราต้องการทราบในวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์คืออะไรบ้าง
- เพราะเหตุใดเราจึงต้องมีการศึกษาถึงลักษณะการใช้ไฟฟ้าภายใน อาคารหรือโรงงาน
- ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็นกี่ประเภท โดยที่เราคิดตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละแห่ง
- ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ สามารถแยกประเภทของกำลังไฟฟ้าได้เป็นได้ออกเป็นกี่ประเภทด้วยกัน
- ค่า Ft คือค่าอะไร
- การคิดค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ โดยมีข้อมูลดังด้านล่างนี้ จงหาเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)

<b>ข้อมูล</b>	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	3.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	< 12 kV
	ความต้องการพลังไฟฟ้า	230 kW
	พลังงานไฟฟ้า	50,000 kWh
	ความต้องการพลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ	270 kVA <sub>r</sub>
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2543

### เฉลย (1)

$$\begin{aligned}
 1.1 \text{ เตารีดไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (750 \times 3) / 1,000 \\
 &= 2.25 \text{ ยูนิต / วัน} \\
 &= 2.25 \times 30 \text{ วัน} \\
 &= 67.5 \text{ ยูนิต / 1เดือน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1.2 \text{ หม้อหุงข้าวไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (600 \times 1) / 1,000 \\ &= 0.6 \text{ ยูนิต / วัน} \\ &= 0.6 \times 30 \text{ วัน} \\ &= 18 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\ 1.3 \text{ เต้าไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (1,000 \times 5) / 1,000 \\ &= 5 \text{ ยูนิต / วัน} \\ &= 5 \times 30 \text{ วัน} \\ &= 150 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\ 1.4 \text{ พัดลมไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (100 \times 10) / 1,000 \\ &= 1 \text{ ยูนิต / วัน} \\ &= 1 \times 30 \text{ วัน} \\ &= 30 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\ \text{รวมยูนิต / เดือน} &= 67.5 + 18 + 150 + 30 \\ &= 265.5 \text{ ยูนิต} \\ \text{คิดเป็นเงินที่ต้องชำระค่าไฟฟ้าใน 1 เดือน (ยูนิตละ 2 บาท)} &= 265.5 \times 2 \\ \text{จะต้องจ่ายค่าไฟฟ้าทั้งสิ้น} &= 531 \text{ บาท / เดือน} \end{aligned}$$

#### เฉลย(2)

การเลือกใช้เครื่องวัดที่มีความเหมาะสมต่อสิ่งที่เราจะหา รวมทั้งก่อนการวัดควรเลือกตั้งย่านของมิเตอร์ในย่านที่สูงๆ ไว้ก่อนแล้วจึงค่อยทำการปรับลดลงมาทีหลังเพื่อความสะดวกในการอ่านค่า และต่อขั้วบวกและลบ ให้ถูกต้อง

#### เฉลย(3)

เพราะเราสามารถลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้โดยการประหยัดพลังงาน ในขณะที่ค่าใช้จ่ายอื่นๆ มักจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ยากจะควบคุม นอกจากนี้การประหยัดพลังงานซึ่งเป็นการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็จะลดลงด้วย

#### เฉลย(4)

ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็น 7 ประเภทด้วยกันโดยที่เราคิดตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละแห่งคือ

- 1) บ้านอยู่อาศัย
- 2) กิจการขนาดเล็ก
- 3) กิจการขนาดกลาง
- 4) กิจการขนาดใหญ่
- 5) กิจการเฉพาะอย่าง

- 6) ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร
- 7) สูบน้ำเพื่อการเกษตร

**เฉลย(5)**

เราสามารถแยกประเภทของกำลังไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรหรือโหลด เป็นกำลังไฟฟ้าที่คำนวณมาจากการถอดรอกที่สองของ  $P^2 + Q^2$  จึงเรียกกำลังไฟฟ้าแบบนี้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Apparent power) หรือค่า S มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์ (VA)

2. กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือเรียกว่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power) หรือ ค่า P หาได้จากสูตร  $EI \cos \theta$  มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

3. กำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Reactive power) หรือค่า Q หาได้จากสูตร  $EI \sin \theta$  มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์รีแอกติฟหรืออาร์ (VAR)

**เฉลย(6)**

ค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ มีค่าเป็นสตางค์ต่อหน่วยเป็นค่า ไฟฟ้าผันแปรที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทุก ๆ 4 เดือน ซึ่งจะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายที่ การไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจาก แผน ผลกระทบของอัตราแลกเปลี่ยน (FOREX) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผน และอัตราเงินเฟ้อ เป็นต้น โดยค่า  $F_t$  จะแยกตามกิจการ ได้แก่ กิจการผลิต กิจการระบบส่ง กิจการระบบจำหน่าย และกิจการค้าปลีก

**เฉลย(7)**

การคำนวณ	
1. ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า	=230x 221.50
	=50,945 บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	=50,000 x 1.7314
	=86,570 บาท
4. ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	=จำนวน kVAr ที่เกินกว่า 61.97% ของ kW Demand
	=270 – 0.6197 x 230 =127
	127 x 14.02 = 1,780.54 บาท
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ( $F_t$ )	=50,000 x 0.00
	=0.00 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	= 50,945 + 86,570 + 1,780.54 + 0.00
	=139,295.54 บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	=139,295.54 x 0.07
	=9,750.69 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	=139,295.54 + 9,750.69
	=149,046.22 บาท

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ , ไฟฟ้าเบื้องต้น . ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [2] Power Tech Group , การส่งจ่ายและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง . พิมพ์ที่ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์,พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2538
- [3] โททม อารียา , อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 . ซีเอ็ดดูเคชั่น , พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2540
- [4] พันศักดิ์ พุฒิมานิตพงษ์ , ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น . ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2544
- [5] ณรงค์ กล่อมสุนทร , งานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป . ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2542
- [6] ณรงค์ ขอนตะวัน , เครื่องวัดไฟฟ้า . ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2538
- [7] วีระ มิ่งวิทิตกุล , กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม . ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย , พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2544
- [8] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ , การออกแบบระบบไฟฟ้า . พิมพ์ที่ ทีซีจี พรินติ้ง ,พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2545
- [9] การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า&วิธีการควบคุมความต้องการ . แผนงานการอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย,คู่มือประกอบการฝึกอบรม”ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน” สำหรับในโครงการควบคุม (F10), กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน,กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- [10] การจัดการใช้ไฟฟ้า,กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, สำนักงาน คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ
- [11] เอกสารการอนุรักษ์พลังงานของญี่ปุ่น