

บทที่ 1

ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Theory of electricity and power electronic)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ในบทนี้เป็นพื้นฐานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เรื่องการอนุรักษ์พลังงาน โดยจะกล่าวถึงอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า วงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ลักษณะการใช้ไฟฟ้าในอาคาร/โรงงาน โครงสร้างค่าไฟฟ้า ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (F_c) ตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าแบบต่างๆ และการควบคุมค่าไฟฟ้าในอาคาร/โรงงาน

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายทฤษฎีไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้
2. อธิบายลักษณะการใช้ไฟฟ้าในอาคาร/โรงงานได้
3. อธิบายโครงสร้างค่าไฟฟ้าได้
4. อธิบายวิธีการควบคุมค่าไฟฟ้าได้

บทนำ (Introduction)

ประโยชน์ของไฟฟ้าต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์โลกมีมากมายมหาศาล ไฟฟ้าช่วยทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ช่วยอำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิต การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า มีหลากหลายวิธีการนำมาใช้งานก็จะเกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งมีผลต่อการใช้พลังงาน และการตรวจวัดทางไฟฟ้าจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงานในระบบไฟฟ้า ตลอดจนการวิเคราะห์ และคำนวณค่าไฟฟ้าตามโครงสร้างค่าไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ และค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (F_c) ทางโรงงานอุตสาหกรรม และอาคารสามารถดำเนินการด้านการอนุรักษ์พลังงานให้เหมาะสมได้จากการคำนวณ ซึ่งจะช่วยให้ลดกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศได้ และลดต้นทุนค่าพลังงานต่อหน่วยได้

1.1 การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า วงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หน่วยวัดทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส กำลังงาน ตลอดจนอุปกรณ์ไฟฟ้าเบื้องต้น เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ

มนุษย์เริ่มค้นพบประจุไฟฟ้าจากการนำเอาแท่งอำพันมาถูกับขนสัตว์ทำให้เกิดประกายไฟ นอกจากนี้เริ่มมีการสังเกตจากการทวีผิม ซึ่งขณะที่ทวีผิมนั้นเกิดการดูดเส้นผมเสมือนมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น มนุษย์เริ่มค้นเคย และรู้จักการนำไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์เมื่อราวปี พ.ศ. 2397 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อไฮนริส เกอเบิลได้ค้นพบหลอดไฟฟ้าชนิดมีไส้ ซึ่งก็ยังมิใช้กันอยู่ หลังจากนั้นได้มีการนำไฟฟ้ามาใช้งานด้านต่างๆ เพิ่มขึ้น เช่น ให้แสงสว่าง ให้ความร้อน ใช้ในงานด้านมอเตอร์ วิทยุ โทรทัศน์ ฯลฯ เป็นต้น โดยสรุป ชีวิตประจำวันของมนุษย์จะต้องมีความเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเสมอ

1.1.1 การกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

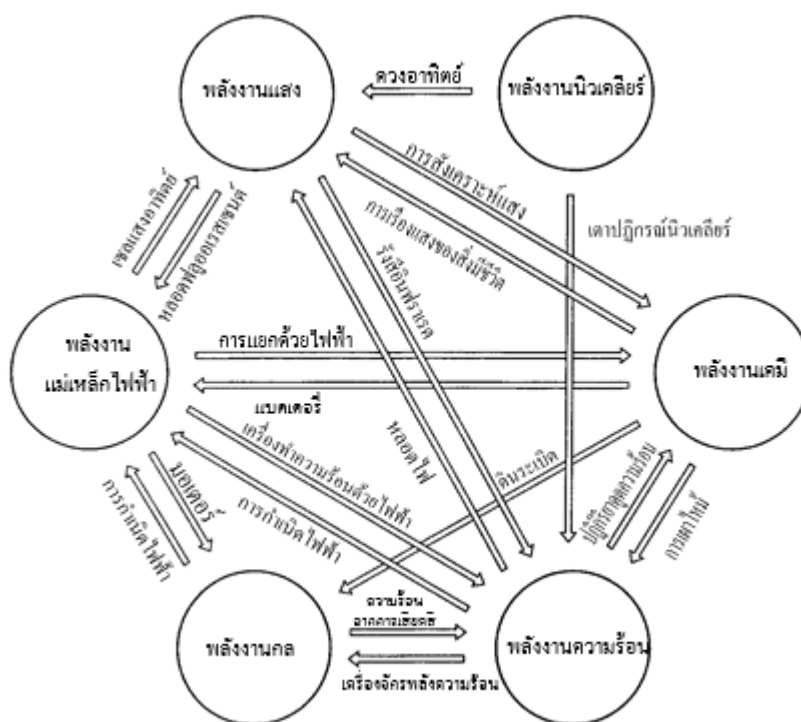
เรามาลองคิดกันดูว่าถ้าไม่มีไฟฟ้าแล้วจะเกิดอะไรขึ้น หลอดไฟจะจุดไม่ติด วิทยุโทรทัศน์จะใช้งานไม่ได้ รถยนต์ก็วิ่งไม่ได้ น้ำประปาก็ไม่ไหล จะหุงข้าวหรือปั่นขนมปังก็ไม่ได้ ดังนั้น ถ้าจะกล่าวว่า ชีวิตประจำวันของเราทุกวันนี้ต้องอาศัยไฟฟ้า ก็คงไม่เกินความจริงนัก เพราะของใช้ที่อยู่รอบๆ ตัวเราเป็นเครื่องไฟฟ้าเกือบทั้งสิ้นตั้งแต่ เตารีด ตู้เย็น เครื่องปั่นขนมปัง โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องใช้ในบ้าน เช่น เต้าแก๊สหุงต้มที่จุดด้วยไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมีโทรศัพท์ โทรเลข และเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ อีกมากมายในอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้านั้นมีแหล่งกำเนิดขึ้นได้ 7 วิธีด้วยกัน และบางวิธีก็สามารถนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งแหล่งกำเนิดดังกล่าวมีดังนี้

1. การเสียดสี (Friction) วิธีการนี้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยการนำวัตถุสองชนิดมาถูกัน
2. แรงกดดัน (Pressure) วิธีการนี้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยการบีบตัวของผลึกคลิสตรอน (Crystal)
3. ความร้อน (Heat) วิธีนี้แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนที่จุดต่อของโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิด
4. แสงสว่าง (Light) วิธีการนี้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยเมื่อมีแสงสว่างส่องกระทบกับสารที่มีความไวต่อแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์
5. ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Action) วิธีการนี้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction) เช่น ในแบตเตอรี่
6. อำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) วิธีการนี้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้โดยเอาตัวนำ ไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก หรือเอาสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำไฟฟ้าในลักษณะเช่นนี้ ตัวนำไฟฟ้า ก็จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กเหมือนกัน จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น
7. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นพลังงานที่ได้นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าของประเทศไทย แต่อีกหลายประเทศมีโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์นี้ใช้แล้ว พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานที่ให้ประโยชน์อย่างมหาศาล แต่ก็เป็ภัยอย่างใหญ่หลวง ถ้าเทคโนโลยีไม่เพียงพอ และจริยธรรมคุณธรรมของผู้ดูแลตั้งแต่กระบวนการก่อสร้างไม่ดี

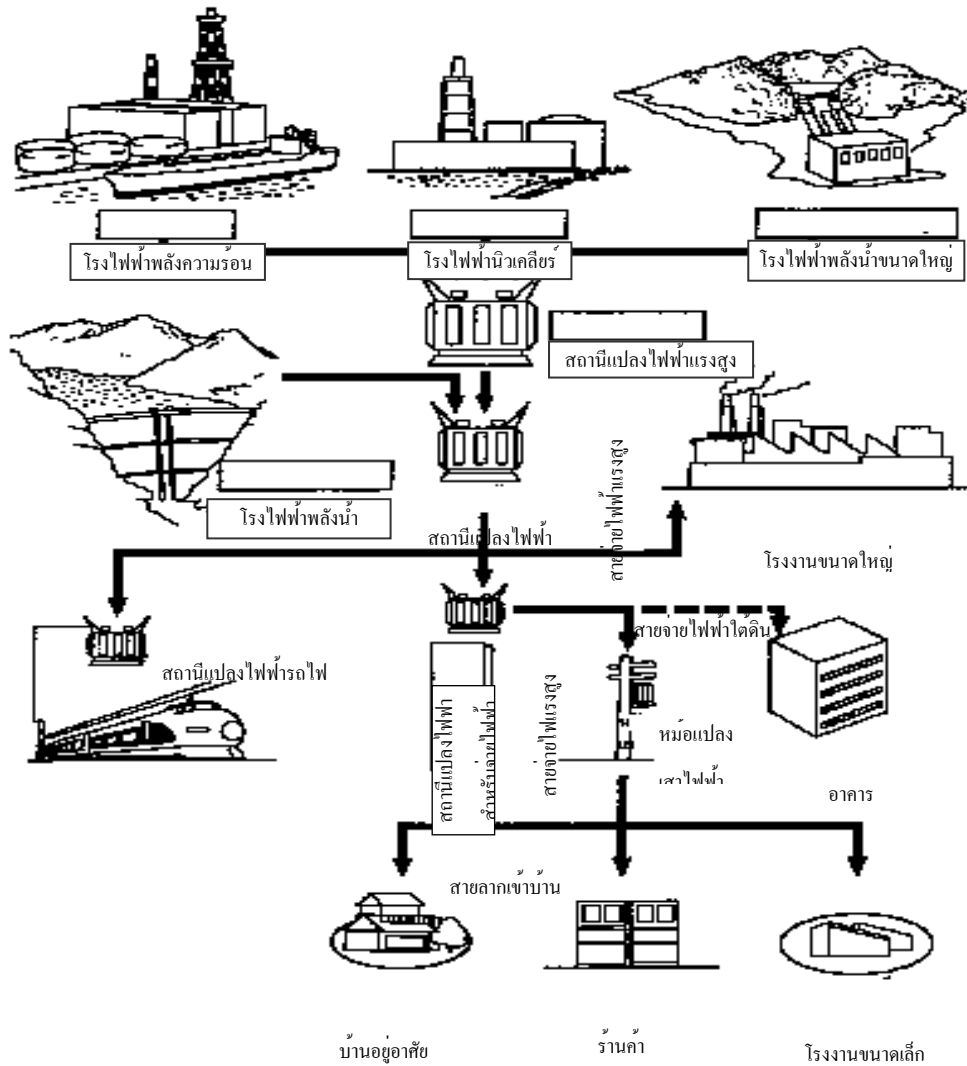
พลังงานแต่ละรูปที่กล่าวมา (เมื่อรวมพลังงานจากการเสียดสี (Friction)) และแรงกดดัน (Pressure) เป็นพลังงานกล จะมีการแปลงรูปของพลังงานไปมาระหว่างกันตามรูปที่ 1.1 ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อน ซึ่งเป็นโรงงานผลิตไฟฟ้า ที่มีการแปลงพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานความร้อนด้วยการเผาไหม้ แปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลด้วยเครื่องจักรพลังความร้อน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

อนึ่ง ในการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานต่างรูปกัน จะต้องมีการสูญเสียพลังงานเสมอ ความสูญเสียนี้เกือบ ทั้งหมดจะกลายเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานที่แปลงมาแล้วแต่ละรูปสุดท้ายก็จะกลายเป็นพลังงานความร้อนเช่นกัน ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากลวิธื่อนำรักษาพลังงานประการหนึ่ง ก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน เพื่อลดการปล่อยพลังงานที่มีคุณภาพต่ำ



รูปที่ 1.1 การแปลงพลังงานระหว่างรูปต่างๆ

โรงไฟฟ้าจะมีหลายประเภท เช่น โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนใต้ดิน โรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังลม เป็นต้น รูปที่ 1.2 แสดงระบบจ่ายไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า (โรงไฟฟ้าพลังความร้อน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ) ของผู้ผลิต ไฟฟ้าทั่วไป ผ่านสายส่งไฟฟ้า สถานีแปลงไฟฟ้า ไปจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า กว่าไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจะเดินทางจากโรงไฟฟ้าไปถึงโรงงาน และอาคารต่างๆ ไม่เพียงแต่จะเกิดความสูญเสียในสายส่งไฟฟ้า และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่พลังงานที่ต้องใช้ในสถานีแปลงไฟฟ้าก็เสมือนหนึ่งเกิดความสูญเสียขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1.2 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า

1.1.2 วิธีใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกพร้อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตัวเอง

ในระยะหลัง สถานประกอบการที่มีระบบกำเนิดไฟฟ้าของตัวเอง เช่น มีระบบโคเจนเนอเรชัน และระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ในโรงงาน และอาคารได้เพิ่มจำนวนมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าจากระบบเหล่านี้จะช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องไฟฟ้าต่างๆ นอกเหนือพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากผู้ผลิตไฟฟ้าทั่วไป

นอกจากนี้ ในระยะหลังยังมีการให้บริษัทผู้ประกอบการเอกชนเข้ามาติดตั้งระบบกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานหรืออาคาร เพื่อจำหน่ายไฟฟ้าที่กำเนิดได้และความร้อนทั้งจากระบบกำเนิดไฟฟ้าสามารถที่นำกลับใช้ได้ให้กับโรงงานหรืออาคารอีกด้วย ผู้ประกอบการแบบนี้เรียกว่า On-site electric power company

ระบบกำเนิดไฟฟ้าของตัวเองในลักษณะนี้ จะติดตั้งอยู่ในที่ดินของโรงงานหรืออาคาร ซึ่งมีข้อดีที่ไม่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจากความสูญเสียในสายส่งและความสิ้นเปลืองในสถานียแปลงไฟเหมือนกับไฟฟ้าทั่วไป

1.1.2.1 ระบบโคเจนเนอเรชัน

ระบบโคเจนเนอเรชันเป็นระบบการใช้พลังงานแบบ Cascade โดยนำพลังงานคุณภาพสูงที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องคอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำความเย็น แล้วนำความร้อนทิ้งที่ได้จากเครื่องต้นกำลังไปใช้ในการปรับอากาศร้อน-เย็นซึ่งต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า ด้วยวิธีการใช้พลังงานในลักษณะนี้ จะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าสูงขึ้น ในปัจจุบันมักจะเรียกระบบที่กำเนิดไฟฟ้า และนำความร้อนทิ้งมาใช้ร่วมกันว่า ระบบโคเจนเนอเรชัน รูปที่ 1.3 แสดงรูประบบโคเจนเนอเรชันในโรงแรม ไฟฟ้าที่กำเนิดได้จากเครื่องยนต์แก๊สและเซลล์เชื้อเพลิง จะนำไปเชื่อมต่อกับไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับภาระ ส่วนความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้จะนำไปใช้ปรับอากาศร้อน-เย็นและจ่ายน้ำร้อน

ระบบโคเจนเนอเรชันที่นำมาใช้ในอาคารภาคบริการ เช่น โรงแรม นี้จะมีความแตกต่างจากโรงงาน เนื่องจากภาระกำลังไฟฟ้าและภาระความร้อนจะขึ้นอยู่กัช่วงเวลาและฤดูกาล ดังนั้นจึงควรมีการบันทึก และวิเคราะห์ข้อมูลการเดินเครื่องหลังจากเริ่มเดินเครื่องแล้วประมาณ 1 ปี เพื่อตรวจสอบว่ามีการเดินเครื่องด้วยสมรรถนะสูง

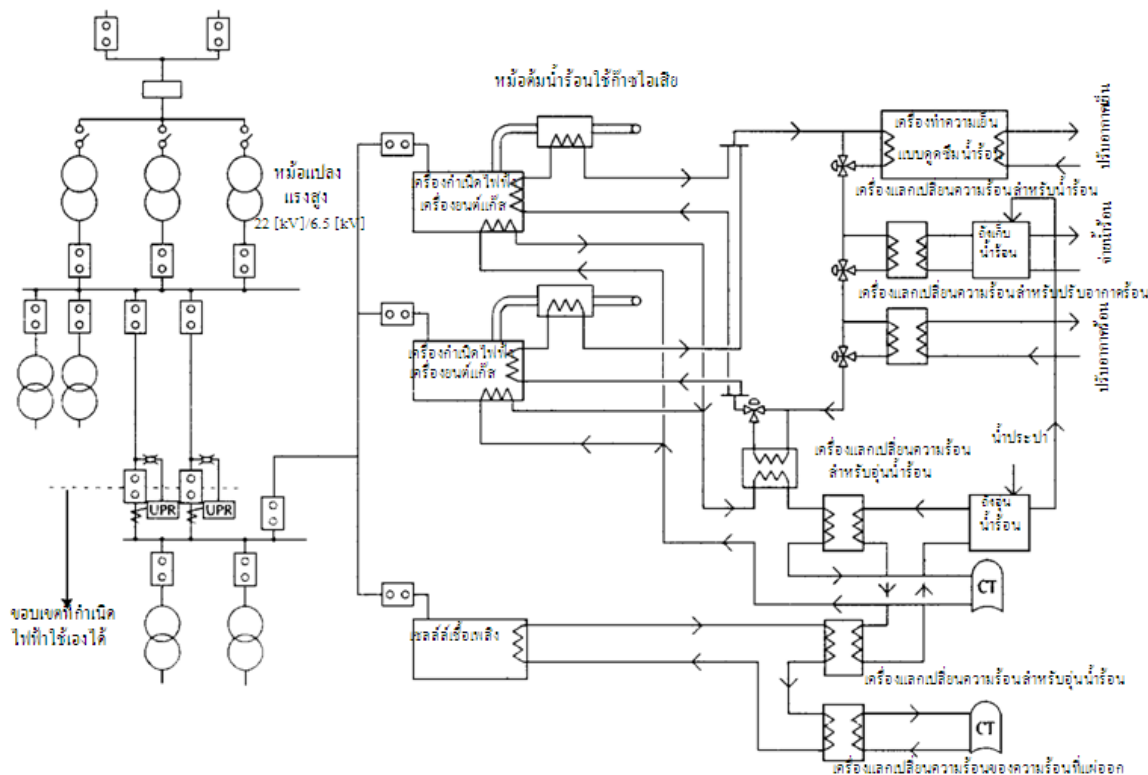
การจะทำเช่นนี้ได้ จะต้องบันทึกปริมาณไฟฟ้าที่กำเนิดได้ ปริมาณความร้อนทิ้งที่นำมาใช้ประโยชน์ และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้า อัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง (อัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนทิ้งที่นำมาใช้ประโยชน์ต่อปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่เครื่องต้นกำลัง) ประสิทธิภาพรวม (ประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้า+อัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง)

กรณีที่ประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ แสดงว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องด้วยภาระไม่เต็มพิกัดเป็นส่วนใหญ่ กรณีที่อัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งมีค่าต่ำ ให้พิจารณาทบทวนวิธีการนำความร้อนทิ้งไปใช้ประโยชน์ หรือตรวจสอบระบบควบคุมอุปกรณ์แหล่งความร้อนช่วย

ในการทำให้มีประสิทธิภาพการอนุรักษ์พลังงานสูง (อัตราการอนุรักษ์พลังงาน มากกว่าร้อยละ 10 ในกรณีของเครื่องยนต์แก๊สจะต้องมีประสิทธิภาพรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 67 กรณีของก๊าซเทอร์ไบน์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 72 และกรณีของเครื่องยนต์ดีเซลล์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 นอกจากนั้น ควรมีการจัดการการเดินเครื่องให้มีระยะเวลาเดินเครื่องเทียบเท่าภาระรวมตลอดปีไม่น้อยกว่า 4,000 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

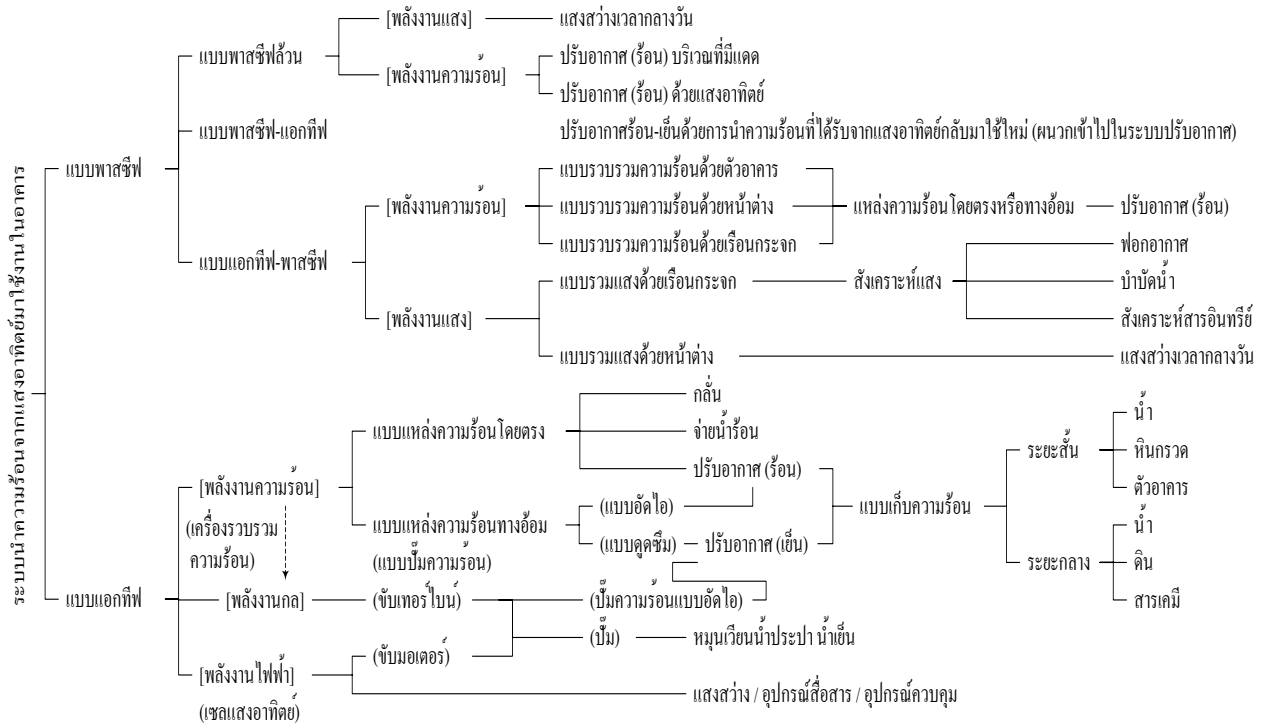
สายหลัก สายสำรอง รับไฟฟ้า 3Ø [W] 22 [kV]



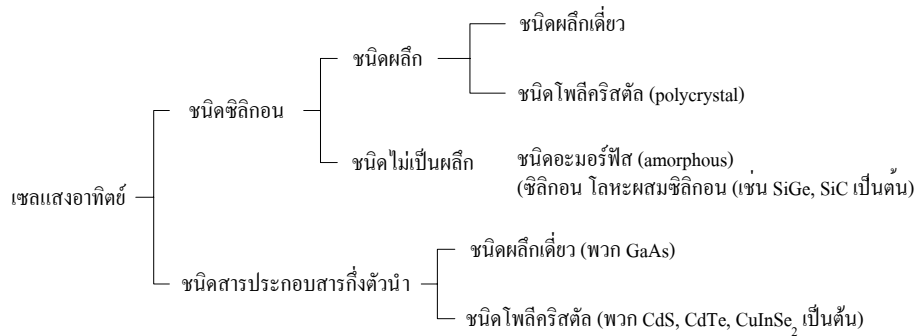
1.1.2.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

หัวใจของระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 6-20 เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพสูงแต่ก็มีจุดอ่อนคือราคาแพง และต้องใช้พลังงานมากในการผลิต

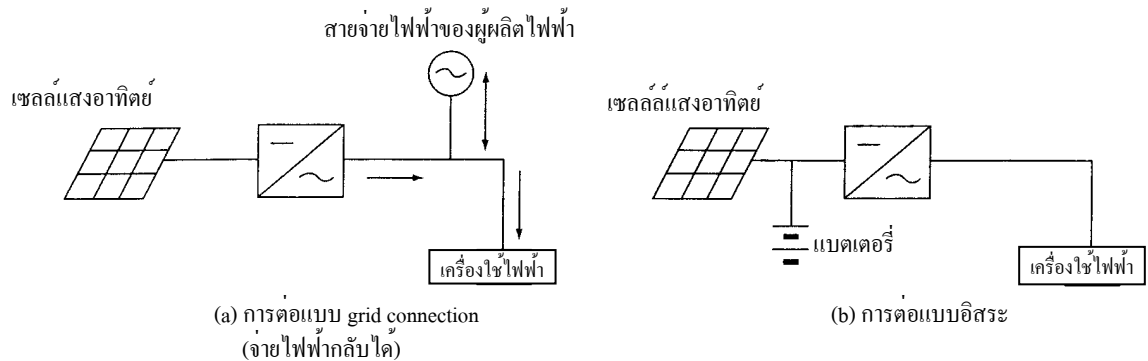
ระบบกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายแบบดังรูปที่ 1.6 โดยการใช้การมีหรือไม่มีแบตเตอรี่ และการต่อวงจรเชื่อมกับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเป็นเกณฑ์ ในโรงงานและอาคารต่างๆ มักจะต่อแบบ Grid connection การต่อวงจรแบบ Grid connection นั้นเมื่อพลังงานไฟฟ้าที่กำเนิดได้มีมากเกินไป จะสามารถจ่ายไฟฟ้ากลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย



รูปที่ 1.4 ประเภทของระบบการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน



รูปที่ 1.5 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.6 ระบบกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์สุริยะ

1.1.3 วงจรไฟฟ้า

1.1.3.1 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

(1) กฎของโอห์ม

เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า E [V] แก่ความต้านทาน R [Ω] จะมีกระแสไฟฟ้า I [A] ไหลเท่ากับ

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

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของโอห์ม

(2) กฎของจูล

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

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

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

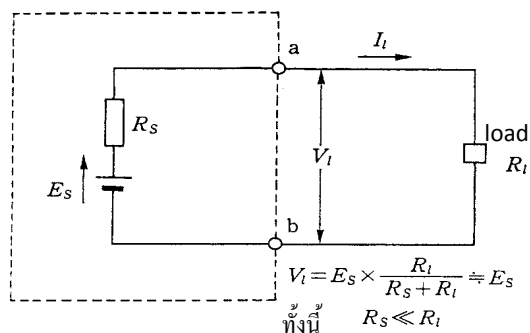
(3) กฎของ Kirchhoff

ความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้า: ผลบวกพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ณ จุดเชื่อมต่อใด ๆ ในวงจรจะเท่ากับศูนย์

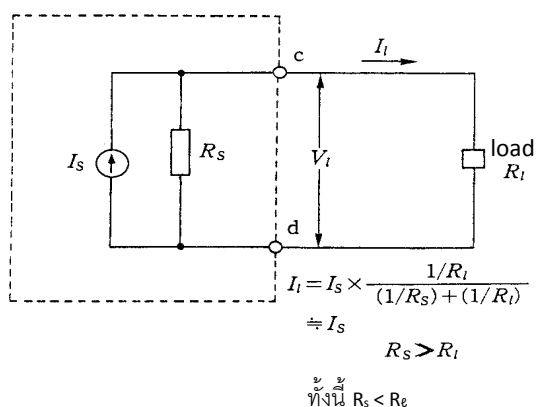
ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า: ในวงจรปิดใดๆ ผลบวกของแรงดันไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ ทั้งหมดตามทิศทางเดินรอบวงจรเดียวกันจะเท่ากับศูนย์

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

วงจรความต้านทานที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ จะสมมูลกับ “วงจรอนุกรมที่ประกอบด้วยตัวต้านทานกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่” หรือ “วงจรขนานที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่” ทฤษฎีแรกเรียกว่า Thevenin's Theorem ทฤษฎีหลังเรียกว่า Norton's Theorem โดย Thevenin's Theorem มีอีกชื่อหนึ่งว่า ทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล และ Norton's Theorem มีอีกชื่อหนึ่งว่า ทฤษฎีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูล นอกจากนี้ แรงดันไฟฟ้า E_S ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า หมายถึงแรงดันไฟฟ้าขณะชั้ว ab เปิดอยู่ อิมพีแดนซ์อนุกรม R_S เป็นค่าความต้านทานวัดที่ชั้วเมื่อลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟและตัดแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจร แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า I_S ให้ถือว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ E_S/R_S โดยค่า R_S เป็นค่าความต้านทานวัดที่ชั้วเมื่อเปิดวงจร



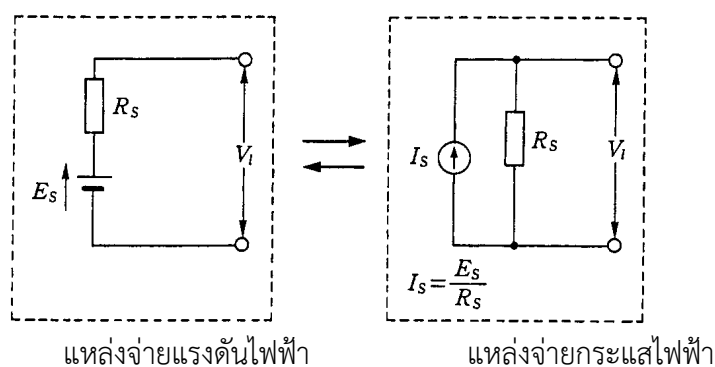
(ก) วงจรโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล



(ข) วงจรโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูล

รูปที่ 1.7 วงจรไฟฟ้าโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล

จากรูปที่ 1.7 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูล และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสมมูลสามารถแปลงไปมาระหว่างกันได้ (ดูรูปที่ 1.8)

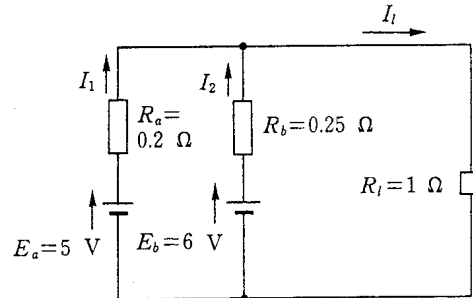


แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้ $I_s = \frac{E_s}{R_s}$

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_t



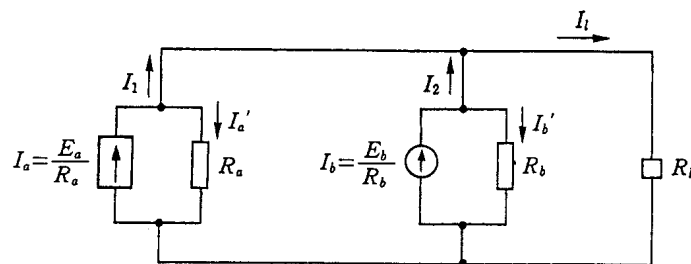
รูปที่ 1.9 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

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

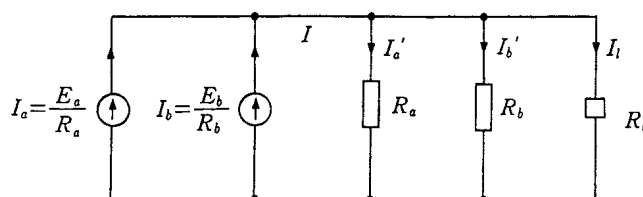
$$I = I_a + I_b = \frac{E_a}{R_a} + \frac{E_b}{R_b}$$

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

กระแสไฟฟ้าในแต่ละเส้นทางในวงจรขนานในรูปที่ 1.10 (ข) จะมีสัดส่วนแปรผันตามการนำไฟฟ้า (ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้า) ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า I_t จึงมีค่าดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

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

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

ในทำนองเดียวกัน 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

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

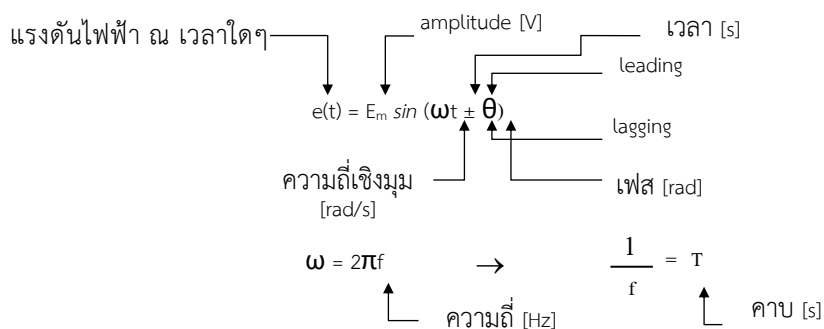
$$I_2 = I_b - I'_b = 24 - 19.6 = 4.4 \text{ A}$$

จะเห็นว่า เมื่อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว ก็สามารถคำนวณวงจรขนานได้สะดวกโดยไม่ต้องใช้กฎของ Kirchhoff

1.1.3.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

(1) กระแสสลับรูปคลื่นไซน์

ส่วนประกอบต่างๆ ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังต่อไปนี้



ค่าเฉลี่ย : กระแสสลับรูปคลื่นไซน์เป็นคลื่นที่มีลักษณะเป็นคาบ จึงคำนวณค่าเฉลี่ยได้จากค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบ ซึ่งค่าเฉลี่ยต่างๆ ที่สำคัญของคลื่นไซน์มีดังต่อไปนี้

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

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

ค่าประสิทธิผล

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

(2) อิมพีแดนซ์

กรณีที่คำนวณกระแสสลับรูปคลื่นไซน์เรามีปริมาณชื่อ อิมพีแดนซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับความต้านทานในวงจรกระแสตรง

- อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม RLC

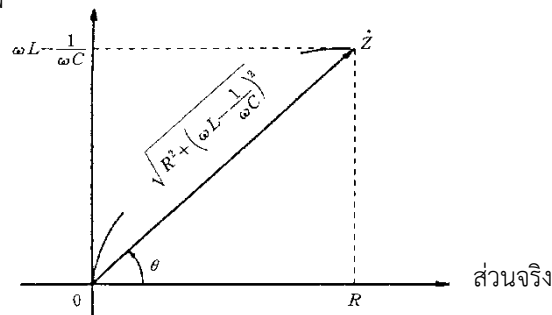
$$\dot{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right): \text{อิมพีแดนซ์จำนวนเชิงซ้อน} \quad (1.3)$$

เมื่อแปลงเป็น Polar coordinate จะได้ว่า

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

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

ส่วนจินตภาพ



รูปที่ 1.11

(3) Symbolic method

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta_e) \rightarrow \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j0_e} = E e^{j0_e} = \dot{E} \quad (1.5)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta_i) \rightarrow \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j0_i} = I e^{j0_i} = \dot{I} \quad (1.6)$$

ค่า Effective

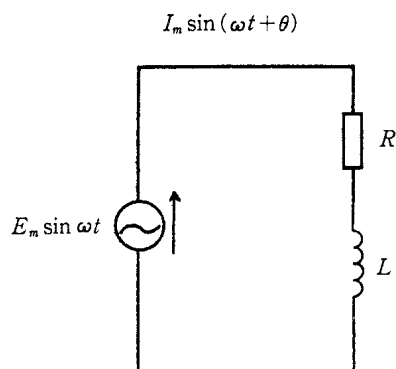
Symbolic method เป็นวิธีการคำนวณโดยให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนเข้าไป แล้วคำนวณแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในวงจรโดยใช้อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่กล่าวไปแล้วข้างต้น คำนวณหาความสัมพันธ์ของ Amplitude ออกมา

หลักการของ Symbolic method ก็คือการบวก ลบ หาคอนุพันธ์ และอินทิเกรตคลื่นไซน์ จะได้คลื่นไซน์ ที่มีความถี่เชิงมุมเท่ากันแต่ Amplitude และเฟสจะต่างกัน

(4) วิธีแก้โจทย์วงจร

ต่อไปนี้จะลองใช้ E , I และ Z ในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรกระแสสลับ

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

นั่นคือ

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

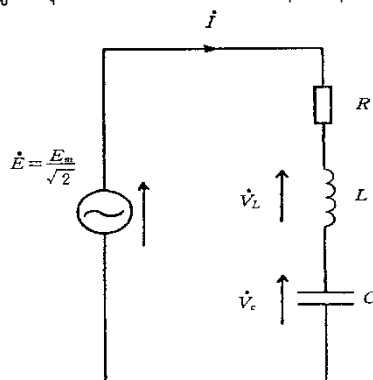
ในที่นี้

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

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 1.13

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 ω เท่ากับ ω_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

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

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

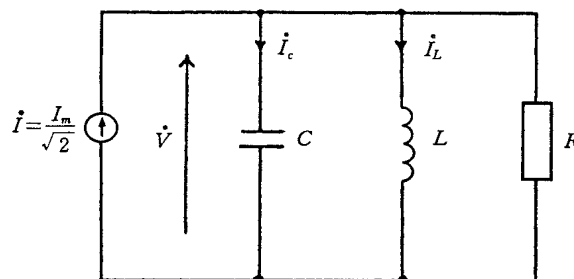
จากความสัมพันธ์ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

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

ค่านี้เรียกว่า ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

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

ตัวอย่าง 1.4 เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า $I_m \sin \omega t$ ให้แก่วงจรเรโซแนนซ์ขนาน RLC ตามรูป 1.14 จงหา $\omega = \omega_0$ ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้ว $|\dot{V}|$ มีค่าสูงที่สุด 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 $|\dot{V}|$ มีค่าสูงที่สุดคือ

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

ในกรณีนี้

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

ดังนั้น

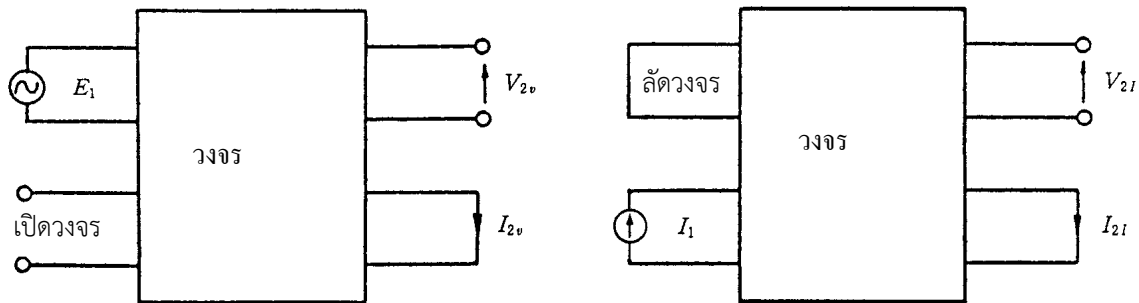
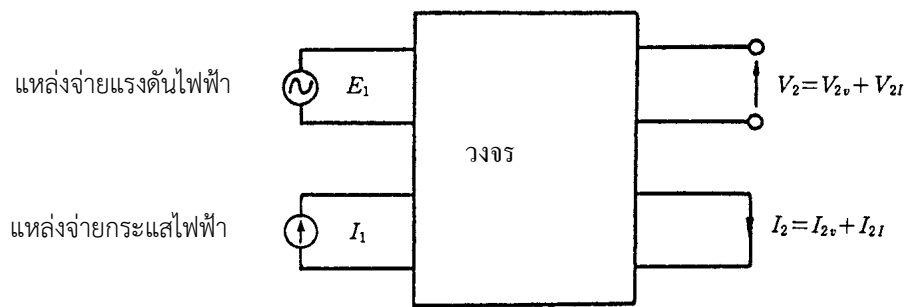
$$|\dot{I}_L| = \frac{1}{\omega_0 L} |\dot{V}|_{\max} = \frac{R}{\omega_0 L} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = Q_p \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$|\dot{I}_C| = \omega_0 C |\dot{V}|_{\max} = \omega_0 R C \frac{I_m}{\sqrt{2}} = Q_p \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

ในที่นี้ Q_p เรียกว่า ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ขนาน

(5) Principle of superposition

รูปที่ 1.15 จะอธิบาย Principle of superposition กล่าวคือ หลักการนี้อธิบายว่า แรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และแหล่งกระแสไฟฟ้า จะเท่ากับผลบวกของ แรงดันไฟฟ้า V_{2v} และ กระแสไฟฟ้า I_{2v} ที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า E_1 เมื่อเปิดวงจร และถอดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากวงจร กับ แรงดันไฟฟ้า V_{2i} และกระแสไฟฟ้า I_{2i} ที่เกิดจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า I_1 เมื่อลัดวงจร และถอดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจร กรณีที่มีทั้งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าหลายตัวอยู่ในวงจร เราสามารถหาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟแต่ละตัวแล้วค่อยนำมาบวกกันได้ตามวิธีข้างต้น



รูปที่ 1.15

ตัวอย่าง 1.5 จงคำนวณหาแรงดันตกคร่อม V ของวงจรในรูป 1.16

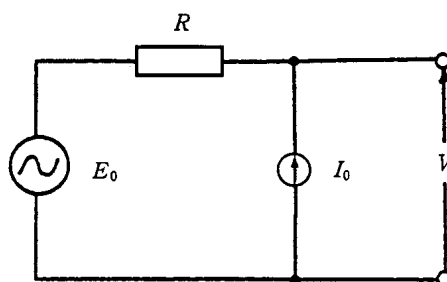
- วิธีทำ:
- แรงดันตกคร่อมที่ขั้วเมื่อเปิดวงจรและถอดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าออก: E_0
 - แรงดันตกคร่อมที่ขั้วเมื่อลัดวงจรและถอดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออก: RI_0
- $\therefore V = E_0 + RI_0$

(6) กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

สมมติให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกระแสสลับเท่ากับ

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

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



รูปที่ 1.16

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P ต่อหนึ่งคาบจะคำนวณได้จาก

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

ส่วนกำลังไฟฟ้าจำนวนเชิงซ้อน P มีสูตรนิยามดังต่อไปนี้

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

กล่าวคือ

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

ขนาดของ P เรียกว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ [VA] ส่วนจริงของ P เรียกว่ากำลังไฟฟ้าจริง P [W] ส่วนจินตภาพของ P เรียกว่า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q [VAR]

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

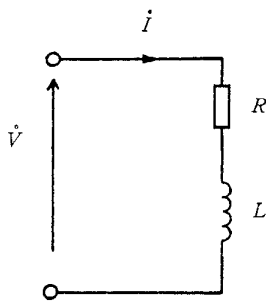
วิธีทำ: จาก $Z = R + j\omega L$

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

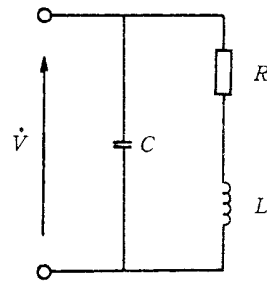
ดังนั้น

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

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



รูปที่ 1.17



รูปที่ 1.18

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

ในที่นี้จะลองพิจารณาเมื่อนำคาปาซิเตอร์ที่ความจุไฟฟ้าสถิต C มาต่อขนานกับวงจรตามรูปที่ 1.18 กำลังไฟฟ้าปรากฏ P ที่ป้อนให้แก่ C สามารถคำนวณได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว $\dot{V}$ ดังนี้

$$\dot{P}_C = j\omega C \dot{V} \dot{V}^* = j\omega C |\dot{V}|^2 = jQ_C$$

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

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

กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของทั้งวงจรจะเท่ากับศูนย์ เหลือแต่กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น กล่าวคือ เพาเวอร์แฟกเตอร์จะเท่ากับ 1 ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า เราสามารถปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหนี่ยวนำได้ด้วยการต่อคาปาซิเตอร์

1.1.4 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

วิธีการต่อวงจรกระแสสลับที่ประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าหลายชุด โดยแต่ละตัวมีความถี่เชิงมุมเท่ากัน แต่มีเฟสไม่พร้อมกัน เรียกว่า กระแสสลับหลายเฟส วิธีที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3 ชุด เรียกว่า ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

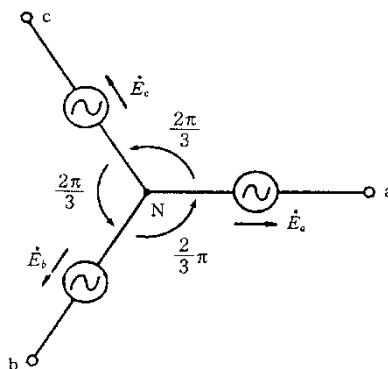
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่มี Amplitude เท่ากัน และมีเฟสแตกต่างกัน $2\pi/3$ rad = 120° เรียกว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร ในรูปที่ 1.19 กรณีที่ e_a , e_b และ e_c เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟสจะเท่ากับ

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

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

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

ซึ่งแสดงได้ตามสูตรข้างต้น



รูปที่ 1.19

ความหมายของโอเปอเรเตอร์ α ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส มีดังต่อไปนี้

เมื่อคำนวณหารากที่สามของ 1 จากสมการ $x^3 = 1$ จะพบว่า

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

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

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 , α , α^2

โอเปอเรเตอร์ α นี้ จึงเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ 1 หน่วยและมีเฟส 120° ($2\pi/3$) นั่นเอง

เมื่อใช้ α 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 โดยนำด้านปลายสุดของแรงดันไฟฟ้าแต่ละ เฟสมาต่อรวมกันที่จุด N (จุดนิวทรัล) $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ เรียกว่าแรงดันเฟส (Phase voltage) กรณีที่แรงดันเฟสเหล่านี้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร จะได้ว่า

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

(2) แหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้า

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

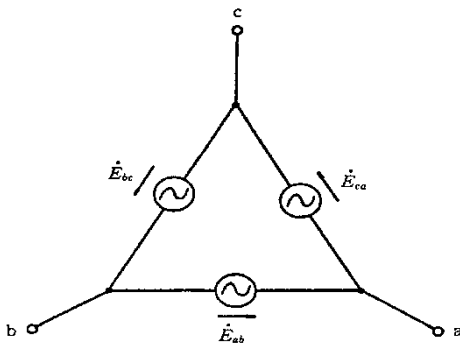
$$\dot{E}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b = (1 - \alpha^2)\dot{E}_a = \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}}\dot{E}_a \quad (1.16)$$

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

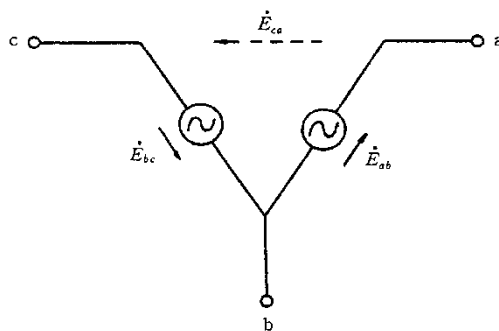
กล่าวคือ แรงดันสายจะมีค่าเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันเฟส และมีเฟสนำอยู่ $\pi/6$ rad จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เราสามารถแปลงวงจรไปมาระหว่างสตาร์กับเดลต้าได้ (รูปที่ 1.20)

(3) แหล่งจ่ายไฟแบบตัว V

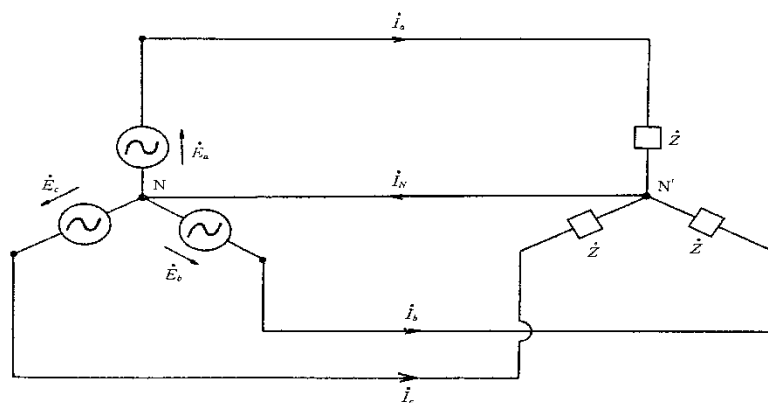
แหล่งจ่ายไฟแบบตัว V คือการแหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้าโดยที่มีแหล่งจ่ายไฟหายไป 1 ตัว แต่เราก็สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสจากการต่อแบบตัว V ได้ (รูปที่ 1.21)



รูปที่ 1.20



รูปที่ 1.21



รูปที่ 1.22

(4) ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

ภาระไฟฟ้า 3 เฟสที่อิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ เรียกว่า ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล หรือ ภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร กรณีที่มีป้อนแรงดันกระแสสลับ 3 เฟสสมมาตรต่อแบบสตาร์ให้กับภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลโดยที่แต่ละเฟสมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะเท่ากับ

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

ดังนั้น

$$\therefore i_a + i_b + i_c = i_N = (1 + \alpha + \alpha^2) i_a = 0 \quad (1.19)$$

จากข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) กรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีลักษณะสมมาตร และภาระไฟฟ้าเป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายนิวทรัล

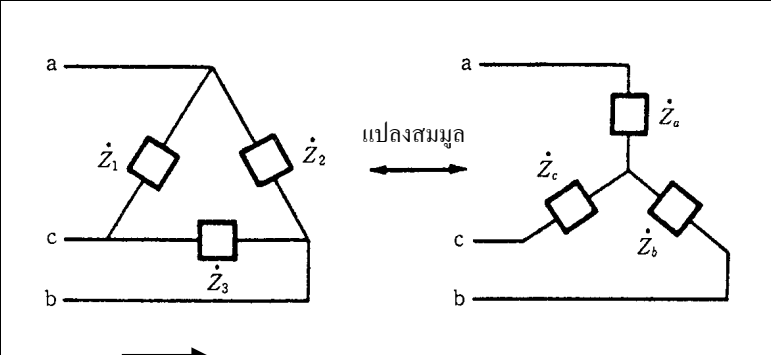
(2) กรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีลักษณะสมมาตร และภาระไฟฟ้าเป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมาตร แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแต่ละสาย และแต่ละเฟสจะมีความแตกต่างกันต่างที่เฟสต่างกัน $2\pi/3$ เท่านั้น ในกรณีนี้เราสามารถพิจารณาวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสว่าเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวได้

(5) การแปลงภาระไฟฟ้าระหว่างสตาร์-เดลต้า

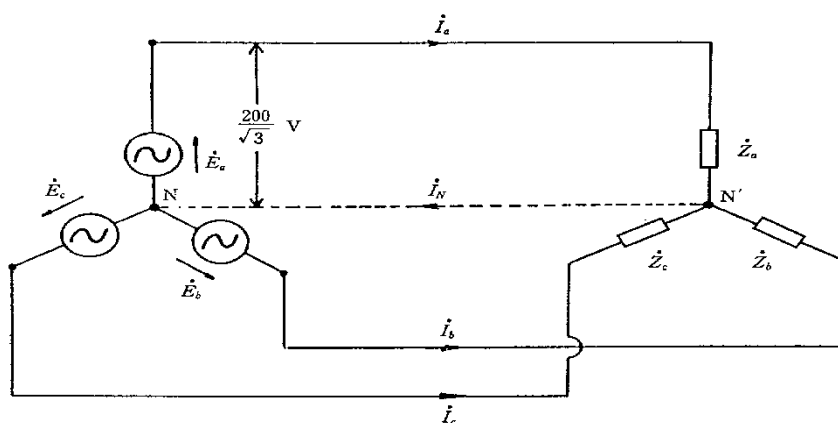
ภาระไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟแบบเดลต้ากับภาระไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟแบบสตาร์ที่มีอิมพีแดนซ์ตามตารางที่ 1.1 จะสมมูลซึ่งกันและกัน สามารถแปลงแทนกันได้

กรณีที่เป็นภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจาก $Z_1 = Z_2 = Z_3$ และ $Z_a = Z_b = Z_c$ ดังนั้น $Z_a = Z_1/3$ และ $Z_1 = 3Z_a$

ตารางที่ 1.1 การแปลงสมมูลระหว่างวงจรเดลต้ากับวงจรสตาร์

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

ตัวอย่าง 1.7 ในรูปที่ 1.23 มีแหล่งจ่ายไฟกระสลับ 3 เฟสสมมาตรมีแรงดันสาย 200V และมีภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมมูล ที่มี $Z = 3 + j4$ ต่ออยู่แบบสตาร์ จงคำนวณหากระแสที่ภาระไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า



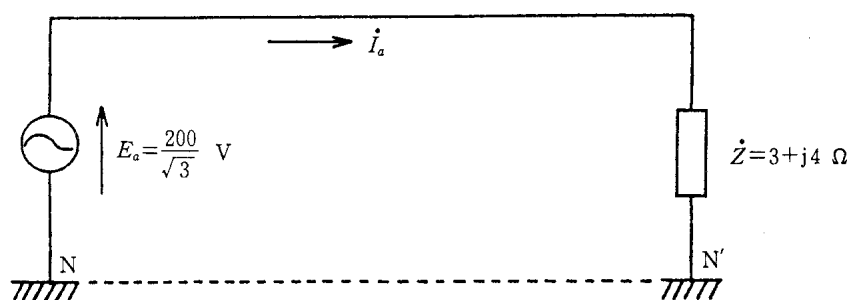
รูปที่ 1.23

วิธีทำ : เนื่องจากการต่อวงจรเป็นแบบสตาร์ ดังนั้นวงจร 1 เฟสจะเป็นดังรูปที่ 1.23

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

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

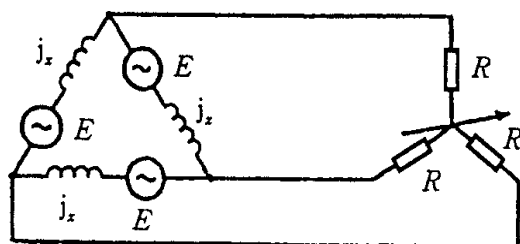
$$\text{ความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า} \quad P = 3 \times \left(\frac{40}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 3 \times 10^{-3} = 4.8 \text{ kW}$$



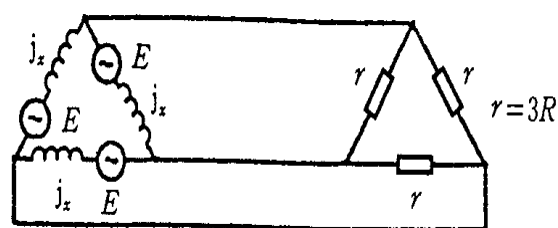
รูปที่ 1.24

ตัวอย่าง 1.8 ในรูปที่ 1.25 มีแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 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

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

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

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

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดของภาระไฟฟ้า 3 เฟสจะเท่ากับ

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

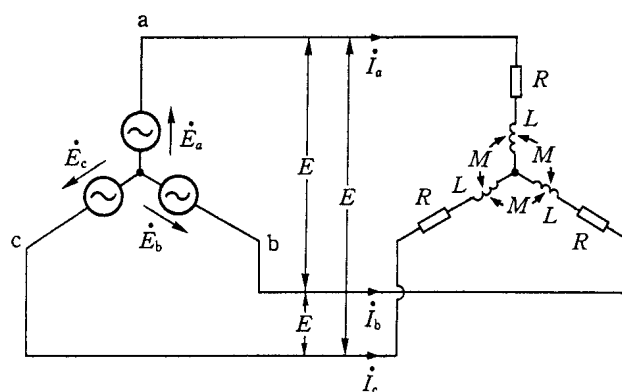
ตัวอย่าง 1.9 ในรูปที่ 1.27 มีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับสมมาตรที่มีแรงดันสาย E (V) มีความถี่เชิงมุม ω (rad/s) ต่อกับภาระไฟฟ้า 3 เฟสที่มีความต้านทานต่อเฟสกับ R (Ω) มี Self inductance ต่อเฟสเท่ากับ L (H) และมี Mutual inductance ระหว่างแต่ละเฟสเท่ากับ M (H)

ในกรณีนี้จึงคำนวณหาคำตอบของคำถามข้อ (1) และ (2) ต่อไปนี้

ทั้งนี้ กำหนดให้ลำดับของเฟส เป็นไปตาม a-b-c และไม่ต้องคิดถึงอิมพีแดนซ์อื่นๆ นอกเหนือจากที่กำหนดในรูป

(1) จงคำนวณกระแสที่ภาระไฟฟ้า I

(2) จงคำนวณเพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้า $\cos \theta$ และความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า P



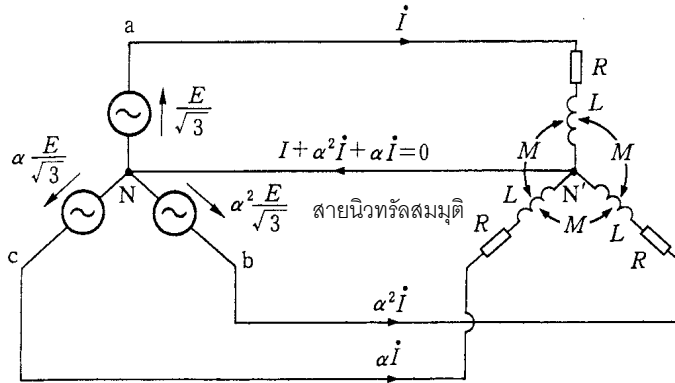
รูปที่ 1.27

วิธีทำ : เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร และภาระไฟฟ้ามีความสมดุล ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟจึงมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลของภาระไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงสามารถเชื่อมต่อทั้งสองจุดเข้าหากันได้โดยไม่มีความเปลี่ยนแปลงใดๆ ทางไฟฟ้า

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

เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff ข้อที่ 1 กับเฟส a จะได้ว่า

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



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 ความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 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

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

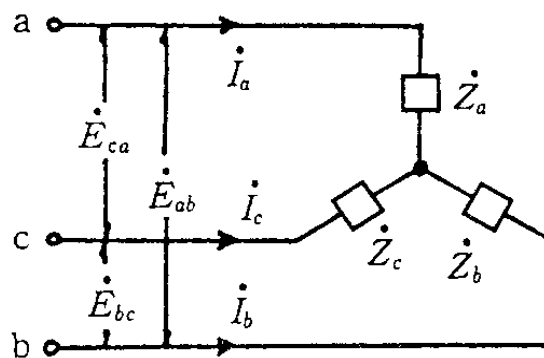
ดังนั้น เพาเวอร์แฟกเตอร์ $\cos \theta$ จึงเท่ากับ

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

(6) วงจรกระแสสลับ 3 เฟสไม่สมดุล

ต่อไปนี้จะอธิบายวิธีการคำนวณกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสในกรณีที่ต่อภาระไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร

วิธีนี้สามารถใช้คำนวณวงจรที่ไม่มีมอเตอร์ได้ทุกวงจรโดยกระแส I_a , I_b , I_c ตามวงจรใน รูปที่ 1.29 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.29

เมื่อใช้กฎของ Kirchhoff จะได้ว่า

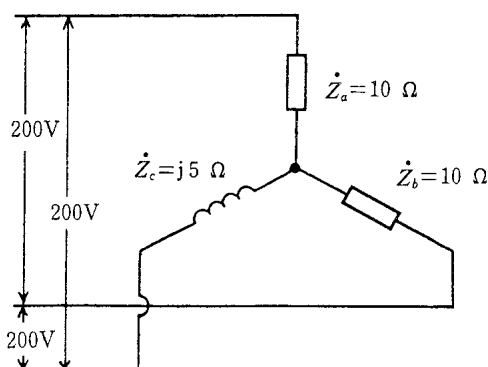
$$\left. \begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0 \\ Z_a I_a - Z_b I_b &= E_{ab} \\ Z_b I_b - Z_c I_c &= E_{bc} \\ -Z_a I_a + Z_c I_c &= E_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

จากสูตร (1.20) เมื่อใช้สมการบนสุด 1 สมการ กับสมการอื่นอีก 2 สมการโดยเลือก จาก 3 สมการในสมการที่ 2 ถึง 4 และแก้สมการหลายตัวแปรเพื่อหาค่า I_a , I_b , I_c จะได้ว่า

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

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

วิธีทำ : ในรูปที่ 1.29 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

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_a &= 5(2 - \sqrt{3} - j\sqrt{3}) \text{ A} \\
 \dot{I}_b &= -5(2 + \sqrt{3} + j\sqrt{3}) \text{ A} \\
 \dot{I}_c &= 10\sqrt{3}(1 + j) \text{ A}
 \end{aligned}$$

ตอนที่ 2 บทที่ 1 ทฤษฎีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ดังนั้น

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

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

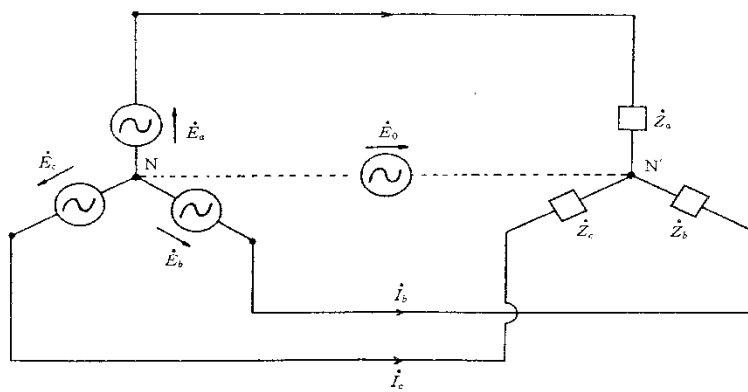
$$|i_c| = 10\sqrt{6} = 24.5 \text{ A}$$

ความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า P จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= 10 \times (5\sqrt{10-4\sqrt{3}})^2 + 10 \times (5\sqrt{10+4\sqrt{3}})^2 \\ &= 5 \text{ kW} \end{aligned}$$

(b) วิธีสมมติศักย์ไฟฟ้าที่จุดนิวทรัล

วิธีนี้เป็นการประยุกต์กฎของ Kirchhoff ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้หลายกรณี ในวงจรกระแสสลับ 3 เฟส 3 สาย เช่นในรูป 1.29 เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าในของละเฟสเท่ากับ E_a, E_b, E_c ให้ จุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟเป็น 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

$$\left. \begin{aligned} E_a - E_0 &= Z_a i_a \rightarrow i_a = \frac{E_a - E_0}{Z_a} \\ E_b - E_0 &= Z_b i_b \rightarrow i_b = \frac{E_b - E_0}{Z_b} \\ E_c - E_0 &= Z_c i_c \rightarrow i_c = \frac{E_c - E_0}{Z_c} \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

$$\text{และ} \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1.23)$$

นำสูตร (1.22) แทนค่าลงในสูตร (1.23)

$$\frac{E_a - E_0}{Z_a} + \frac{E_b - E_0}{Z_b} + \frac{E_c - E_0}{Z_c} = 0$$

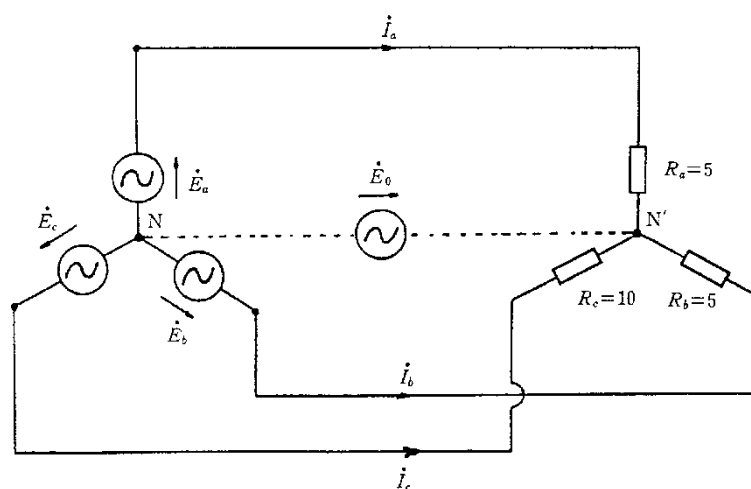
ดังนั้น

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

เมื่อกำหนด $\dot{E}_0$ จากสูตรนี้ แทนค่ากลับเข้าไปใน (1.22) จะหาค่า I_a , I_b , I_c ได้สูตร (1.24) เรียกว่า Millman's theorem

ตัวอย่าง 1.11 ในรูปที่ 1.31 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 เฟส สมมาตรมีแรงดัน 200V จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระไฟฟ้าที่มีความต้านทาน 5Ω , 5Ω , 10Ω ต่อแบบสตาร์ จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟส และความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า 3 เฟส

วิธีทำ: ในรูป 1.32



รูปที่ 1.32

เมื่อนำ $\dot{E}_a = \frac{200}{\sqrt{3}}$, $\dot{E}_b = \alpha^2 \frac{200}{\sqrt{3}}$, $\dot{E}_c = \alpha \frac{200}{\sqrt{3}}$, $R_a = R_b = 5\Omega$, $R_c = 10\Omega$ แทนค่าลงในสูตร (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 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีลักษณะการใช้งานที่สำคัญทางด้านการสื่อสารด้วยสัญญาณความถี่สูง และทางด้านการขยายสัญญาณ ต่อมาปี พ.ศ. 2490 จึงเริ่มมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า การค้นพบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์และไทรสเตอร์ ซึ่งมีขนาดเล็ก และมีความเชื่อถือที่สูงได้ทำให้วงการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมด้านการควบคุมกระบวนการผลิตโดยอัตโนมัติได้อย่างดี

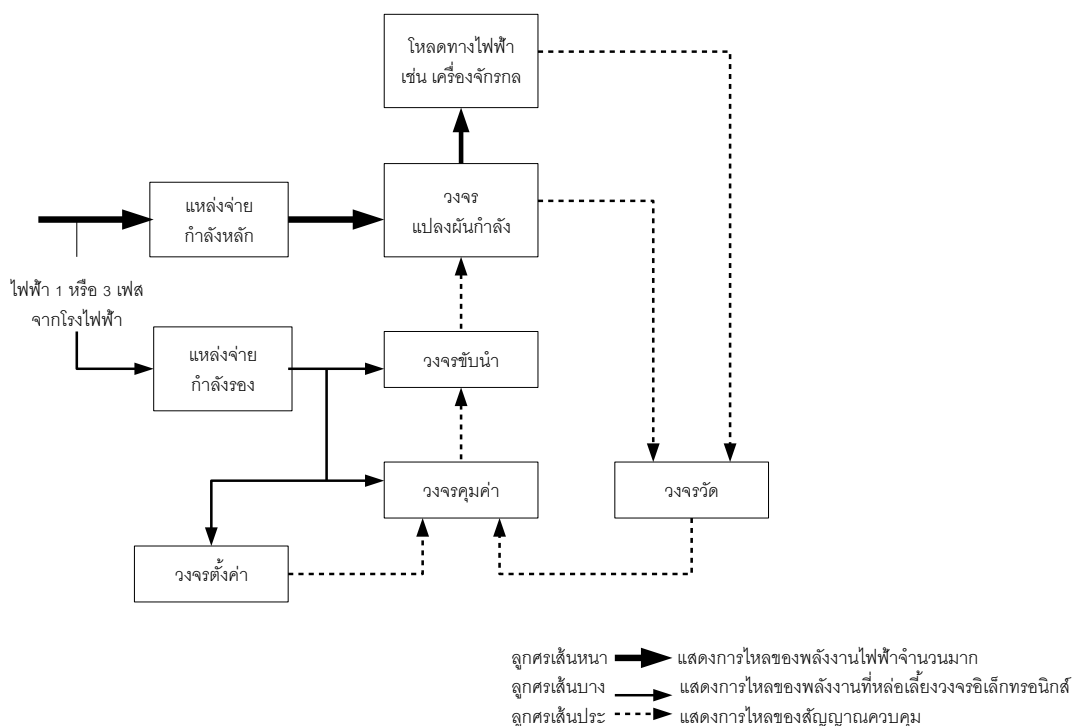
นอกจากจะใช้ในการสื่อสารและการควบคุมแล้ว ประโยชน์ที่สำคัญของไฟฟ้าก็คือการนำมาใช้เป็นพลังงาน วิธีการหนึ่งในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าคือการใช้สวิตช์ การแปลงผันเช่นนี้จะมีประสิทธิภาพที่สูง เพราะกำลังการสูญเสียในสวิตช์มีค่าต่ำ เราเคยใช้รีเลย์กลไฟฟ้าเป็นสวิตช์ แต่สวิตช์เช่นนี้ทำงานได้ดีที่ความถี่ต่ำ อันที่จริงไดโอดก็ทำหน้าที่เป็นสวิตช์แบบหนึ่ง แต่ทรานซิสเตอร์ และไทรสเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์ได้ดีกว่า เพราะสามารถควบคุมได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เราเรียกสวิตช์เช่นนี้ว่าสวิตช์สถิต (Static Switch) และเรียกววงจรแปลงผันพลังงานที่ใช้สวิตช์เช่นนี้ว่าวงจรแปลงผันสถิต (Static Converter) ทั้งนี้โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างกับรีเลย์ซึ่งเป็นสวิตช์ที่มีการเคลื่อนไหวของหน้าสัมผัส

เมื่อเราใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุม และขับนำสวิตช์ และวงจรทั้งหมดสามารถแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก เราจึงเรียกววงจรเช่นนี้ว่า “วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง” อนึ่ง การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้มีความสะดวกในการควบคุมพลังงานไฟฟ้า ทั้งการควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop) และวงรอบปิด (Closed Loop) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลัง และระบบควบคุม ดังรูปที่ 1.33 แสดงแผนภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วย วงจรกำลัง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรควบคุม



รูปที่ 1.33 แผนภาพระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รูปที่ 1.33 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวอย่างของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรคุมค่า (Regulator) วงจรตั้งค่าตัวแปร (Variable – Setting) วงจรวัดซึ่งมักจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงอนุมาณ (Analog) หรือเชิงตัวเลข (Digital) แต่หน้าที่ของวงจร จะเป็นไปในด้านการควบคุม ส่วนวงจรกำลังทำหน้าที่แปลงผันพลังงานให้เหมาะสมกับโหลด



รูปที่ 1.34 แผนภาพของตัวอย่างระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.1.5.1 ลักษณะและหน้าที่ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(1) นิยาม

อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นวิชาที่ว่าด้วยการแปลงผันพลังงานโดยใช้สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสวิตช์

(2) องค์ประกอบวงจร

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จะกล่าวถึงตอนนี้กล่าวถึง “วงจรแปลงผันกำลังแบบอิเล็กทรอนิกส์” (วงจรที่มีพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่แสดงดังรูปที่ 1.34 ในสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และไฟฟ้ากำลัง ประสิทธิภาพเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ถ้าตัวต้านทานอยู่ในฐานะเป็นโหลดคือเอาพลังงานไปใช้ประโยชน์อะไรก็ไม่เป็นไร แต่ถ้าเอา ตัวต้านทานไปใส่ไว้ในส่วนอื่นๆ อาจทำให้เกิดกำลังสูญเสียโดยไม่จำเป็น จึงกล่าวได้ว่าเราไม่นิยมตัวต้านทานในวงจรกำลัง ในด้านองค์ประกอบไวงานคงจะต้องตัดสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเชิงเส้นออกไปด้วยเหตุผลเดียวกัน คือจะเกิดความสูญเสียโดยไม่จำเป็น ข้อแตกต่างระหว่างไฟฟ้ากำลัง และอิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ตรงที่ว่า ในวิชาไฟฟ้ากำลังจะนิยมใช้เครื่องกลไฟฟ้ามากกว่า ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้ากำลังจะนิยมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสวิตช์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก (ดูรูปที่ 1.35 (ข) และ (ค))

R	C	L	หม้อแปลง
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเชิงเส้น	สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสวิตช์	เครื่องกลไฟฟ้า	

(ก) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางอิเล็กทรอนิกส์

R	C	L	หม้อแปลง
สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เชิงเส้น	สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ สวิตชิง		เครื่องกลไฟฟ้า

(ข) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

R	C	L	หม้อแปลง
สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ เชิงเส้น	สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ สวิตชิง		เครื่องกล ไฟฟ้า

(ค) องค์ประกอบหลักที่ใช้ในทางไฟฟ้ากำลัง

รูปที่ 1.35 องค์ประกอบหลักของวงจรชนิดต่างๆ

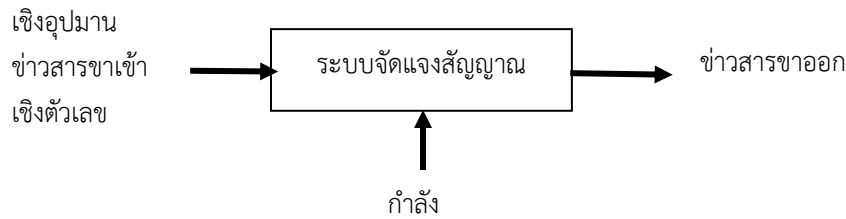
(3) ความถี่และกำลัง

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

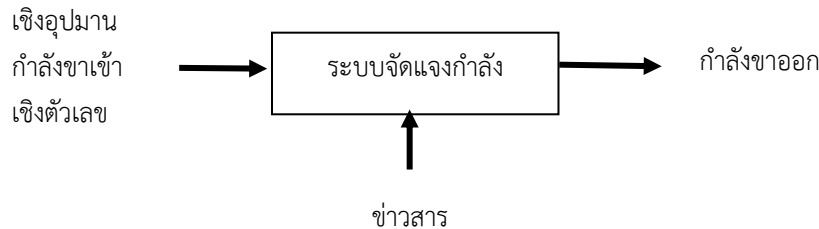
เมื่อพิจารณาในแง่กำลัง การแบ่งเขตแดนย่อมทำได้ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตาม วงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีกำลังต่ำคือ ประมาณไม่เกิน 10 ถึง 100 W วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจมีกำลังตั้งแต่กิโลวัตต์ถึงเมกะวัตต์ ส่วนในด้านไฟฟ้ากำลังนั้นอาจมีกำลังตั้งแต่กิโลวัตต์ถึงจิกะวัตต์

(4) หน้าที่หลัก

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



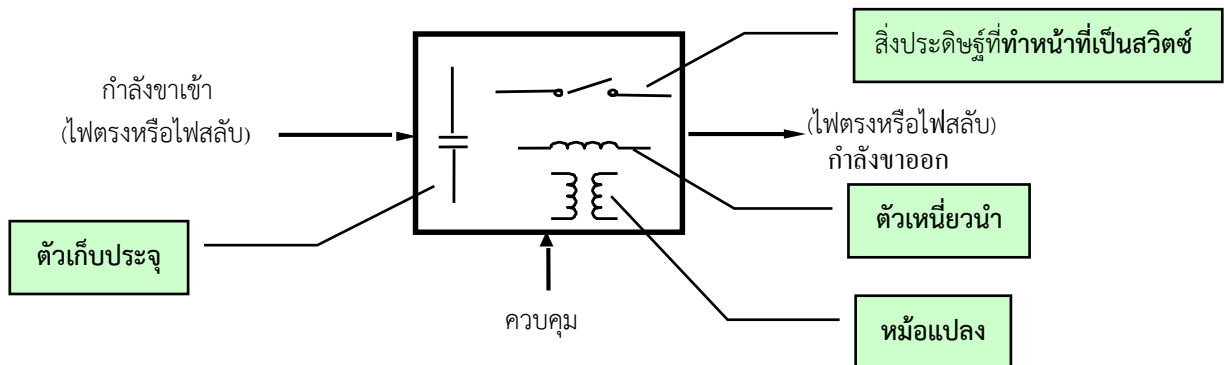
(ก)



(ข)

รูปที่ 1.36 แผนภาพจำแนกระบบจัดแรงสัญญาณและระบบการจัดแรงกำลัง

ถ้าเขียนแผนภาพบล็อกของวงจรแปลงผันกำลังซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นว่องค์ประกอบที่สำคัญ คือ C,L และหม้อแปลง และสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ต่อรวมอยู่ด้วยกันดังแสดงได้ในรูปที่ 1.37

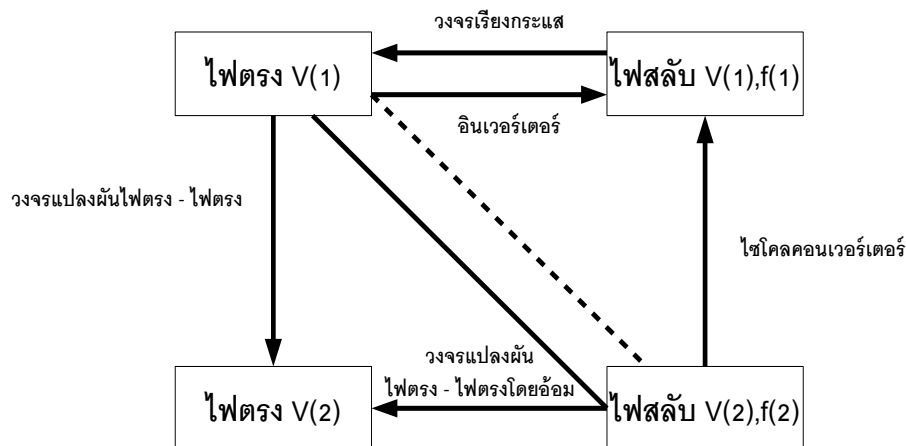


รูปที่ 1.37 แผนภาพบล็อกของวงจรแปลงผันกำลังแบบอิเล็กทรอนิกส์ (แสดงองค์ประกอบหลักของวงจร)

วงจรแปลงผันกำลังจะมีชื่อเรียกเฉพาะลงไปอีก แล้วแต่หน้าที่ของมัน เช่น

- วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรง มีชื่อเรียกว่า วงจรชอปเปอร์ (Choppers)
- วงจรแปลงผันไฟสลับ – ไฟตรง มีชื่อเรียกว่า วงจรเรียงกระแส (Rectifiers)
- วงจรเรียงกระแสควบคุม (Controller Rectifiers) ฯลฯ
- วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับ มีชื่อเรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
- วงจรแปลงผันไฟสลับ – ไฟสลับ มีชื่อเรียกว่า วงจรควบคุมแรงดันไฟสลับ (AC voltage control)
- วงจรควบคุมค่าไฟสลับไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverters)

นอกจากนี้การแปลงผันอาจจะกระทำได้อีกโดยอ้อม เช่น การแปลงผันไฟตรง – ไฟตรงโดยอ้อมกระทำได้โดยการแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับ ตามด้วยการแปลงผันไฟสลับ – ตรง รูปที่ 1.38 แสดงหน้าที่การแปลงผันพลังงานของวงจรต่าง ๆ



รูปที่ 1.38 วงจรและหน้าที่การแปลงผันพลังงาน

(5) สรุปลักษณะและหน้าที่

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

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

อิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนา และการแยกตัวออกเป็นสาขาเอกเทศ จึงได้มีการพัฒนางจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจนมีสมรรถนะที่ดีขึ้นตามลำดับ ทำให้สามารถขยายขอบเขตการประยุกต์ให้กว้างขวางออกไป

1.1.5.2 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 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

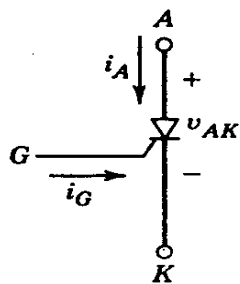
- ทิศทางของกระแส : กระแสไหลได้ทิศทางเดียวหรือสองทิศทาง
- การทำงานแบบ ON : อุปกรณ์ที่เปลี่ยนสถานะจาก OFF เป็น ON ได้ด้วยสัญญาณควบคุม ขณะที่มีความดันบวกจ่ายอยู่
- การทำงานแบบ OFF : อุปกรณ์ที่เปลี่ยนสถานะจาก ON เป็น OFF ได้ด้วยสัญญาณควบคุม ขณะที่มีความดันจ่ายอยู่

(2) คุณสมบัติ

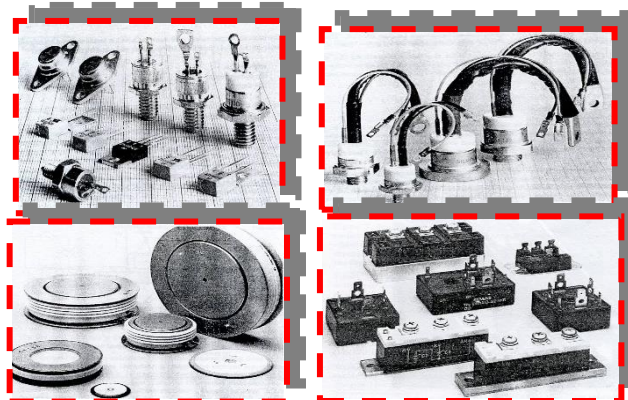
- ไทรสเตอร์ : โดยทั่วไปคำว่าไทรสเตอร์จะหมายถึงไทรสเตอร์ 3 ขั้วสำหรับป้องกันกระแสไหลกลับทิศ อุปกรณ์นี้ไม่มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็น ON แล้วแม้ว่าจะหยุดป้อนสัญญาณควบคุม กระแสก็ยังสามารถไหลผ่านได้ต่อไป การเปลี่ยนสถานะเป็น OFF ต้องใช้วงจรภายนอกลดกระแสขั้วบวกให้ต่ำกว่ากระแสโฮลติ่ง หรือป้อนแรงดันกลับขั้วระหว่างขั้วบวก-ขั้วลบเป็นระยะเวลาหนึ่ง
- GTO : อุปกรณ์นี้มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อให้กระแสควบคุมลบจะเปลี่ยนสถานะเป็น OFF
- ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ IGBT และเพาเวอร์ MOSFET : อุปกรณ์นี้มีการทำงานแบบ OFF โดยเมื่อหยุดป้อนสัญญาณควบคุมจะเปลี่ยนสถานะเป็น OFF แต่หากได้รับแรงดันกลับขั้วแม้เพียงเล็กน้อยจะเสียหายที่ ดังนั้น หากมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันกลับขั้วจะใช้ไดโอดต่อนุกรมหรือต่อขนานไว้ด้วย
- ไทรแอก : กระแสไหลได้สองทิศทาง ไม่แยกขั้วบวกขั้วลบ ไม่มีการทำงานแบบ OFF โดยมีคุณลักษณะคล้ายกับไทรสเตอร์

(3) รูปร่างและสัญลักษณ์

SCR (Silicon Control Rectifier) [Thyristor Devices]

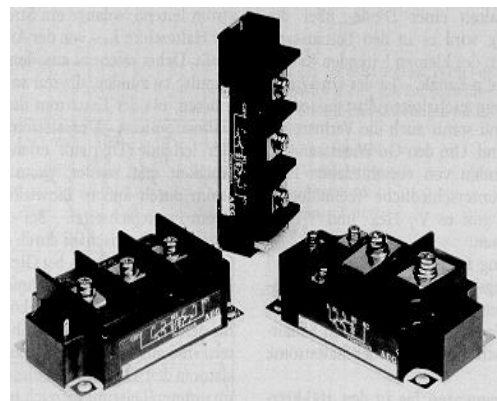
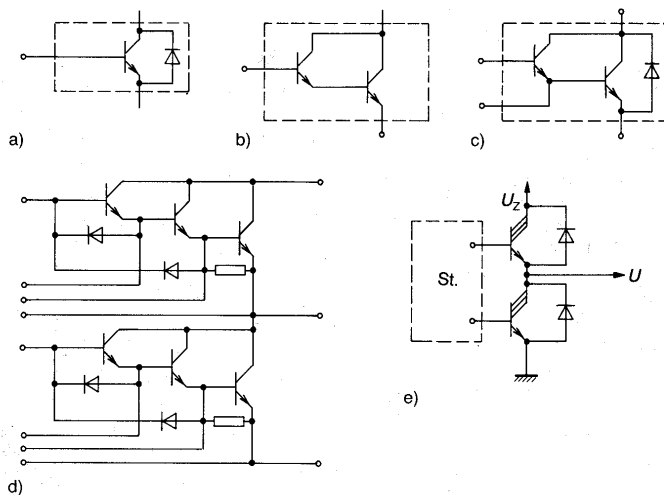


(ก) สัญลักษณ์



(ข) รูปร่างลักษณะ

Bipolar Transistor (BT)

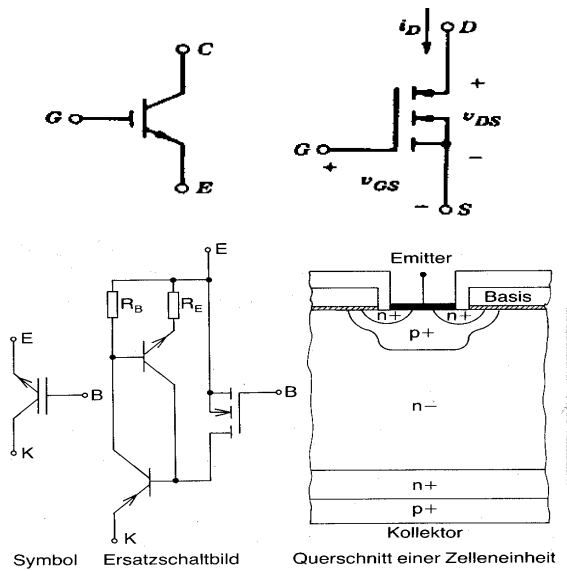


(ก) จากรูป a-e เป็นภาพสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบต่างๆ

(ข) รูปร่างลักษณะ

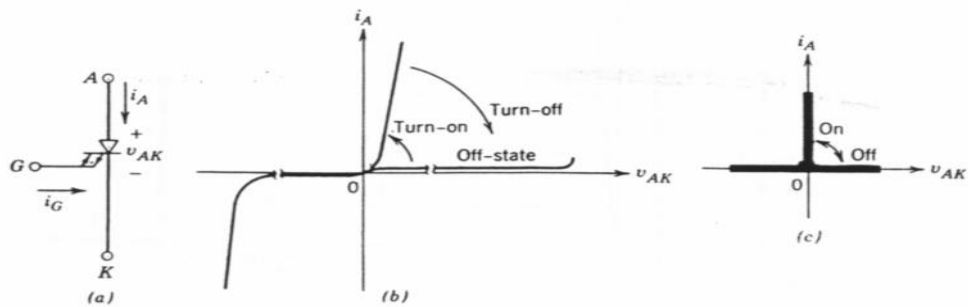
รูปที่ 1.39 รูปร่างและสัญลักษณ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)



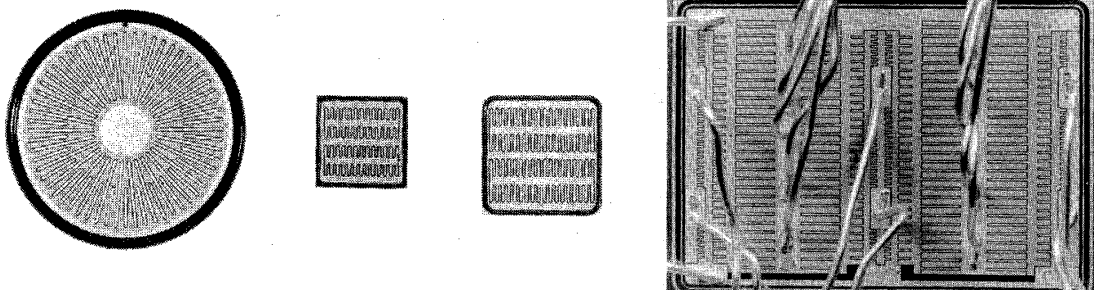
สัญลักษณ์ วงจรสมมูลและภาพตัดขวางของอุปกรณ์ IGBT IGBT – Module และภาพภายในของอุปกรณ์

Gate-Turn-Off THYRISTOR (GTO)



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

(ก) สัญลักษณ์และคุณลักษณะ



(ข) รูปร่างลักษณะ

รูปที่ 1.40 รูปร่างและสัญลักษณ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

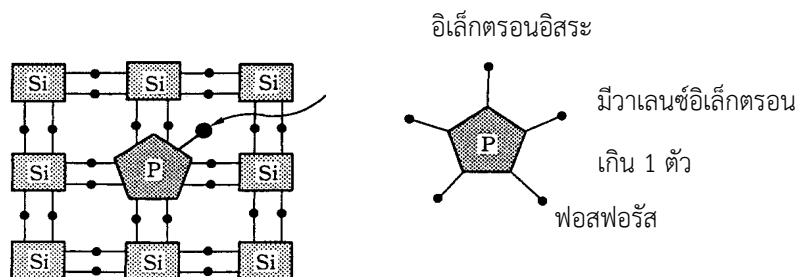
1.1.5 วงจรอิเล็กทรอนิกส์

(1) สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีอัตราความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับฉนวนไฟฟ้า โดยมีอัตราความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-5} – 10^4 Ω ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน เยอรมาเนียม เป็นต้น สารกึ่งตัวนำแบ่งเป็น “สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์” ซึ่งแทบไม่มีสารเจือปนใดๆ กับ “สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์” ที่มีสารอื่นเจือปนเล็กน้อย สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ยังแบ่งออกได้เป็น “สารกึ่งตัวนำชนิด p” กับ “สารกึ่งตัวนำชนิด n” อีกด้วย

(2) สารกึ่งตัวนำชนิด n

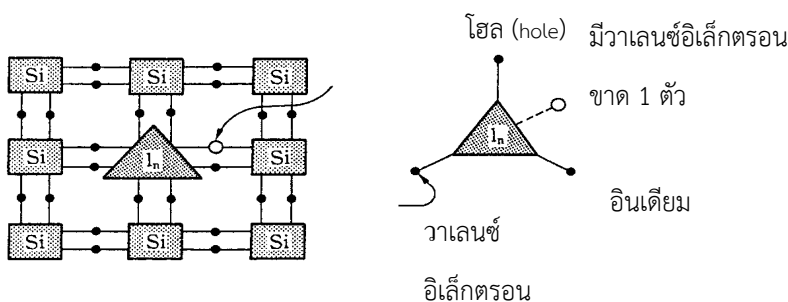
สารกึ่งตัวนำชนิด n มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.41 เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 4 เช่น ซิลิกอน นำมาเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 5 (Donor) เช่น ฟอสฟอรัส ฯลฯ ลงไปเล็กน้อยในผลึกของสารนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเกินอยู่ 1 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระสามารถนำไฟฟ้าได้ อิเล็กตรอนอิสระและโฮล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



รูปที่ 1.41 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด n

(3) สารกึ่งตัวนำชนิด p

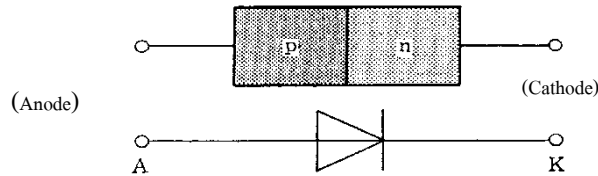
สารกึ่งตัวนำชนิด p มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.42 เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 4 เช่น ซิลิกอน นำมาเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 3 (Acceptor) เช่น โบรอน อินเดียม ฯลฯ ลงไปเล็กน้อยในผลึกของสารนี้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนขาดอยู่ 1 ตัว ทำให้เกิดโฮล (Hole) ขึ้นตรงจุดนั้น และทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 1.42 โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิด p

(4) ไดโอด

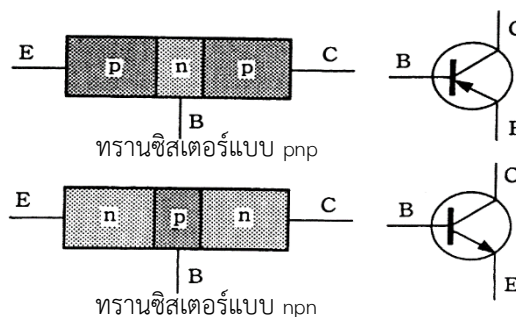
ไดโอดเป็นอุปกรณ์ (Device) 2 ขั้ว ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n นำมาต่อกันดังรูปที่ 1.43 ไดโอดแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น Point-contact diode กับ Junction diode มีหน้าที่การทำงานเป็น Rectifier และ Detection



รูปที่ 1.43 โครงสร้างและสัญลักษณ์ไดโอด

(5) ทรานซิสเตอร์

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



รูปที่ 1.44 โครงสร้างและสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์

ตัวอย่าง 1.12 จงเลือกคำที่ถูกต้องจากตัวเลือกที่ให้มา เติมลงในวงเล็บ

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

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

วิธีทำ : (1)-(ค) (2)-(ช) (3)-(ฐ) (4)-(ก) (5)-(จ) (6)-(ฑ)

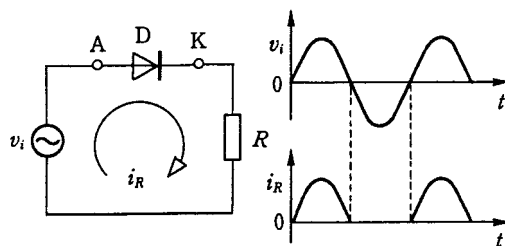
คำอธิบาย เมื่อคำนึงถึงโครงสร้างของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะโคจรรอบนิวเคลียส โดยมีวงโคจรหลายวง ยิ่งอิเล็กตรอนอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางเท่าใด พันธะกับอะตอมก็ยิ่งแข็งแรงขึ้นเท่านั้น วงจรโคจรที่มีอิเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมากเรียกว่า Band โดยวงโคจรชั้นนอกสุดและไกลออกไปกว่านั้นแบ่งออกเป็น Valence band,

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

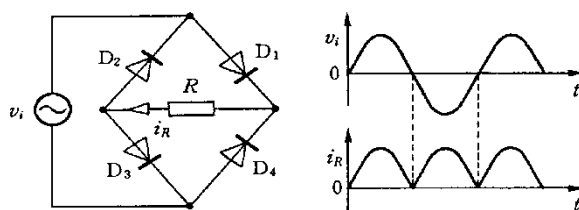
เมื่อต่อไดโอดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 1.45 กระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็น Half wave



รูปที่ 1.45 วงจร Half-wave rectifier

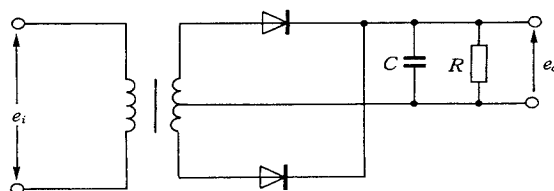
(2) Full-wave rectifier

วงจรดังรูปที่ 1.46 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันทั้งในช่วงคลื่นบวกและลบ ได้คลื่นรูป Full wave



รูปที่ 1.46 วงจร Full-wave rectifier

ตัวอย่าง 1.13 ในวงจร Rectifier ที่ประกอบด้วยไดโอดดังรูปที่ 1.47 ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ C และตัวต้านทาน R เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ เท่ากับ 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)



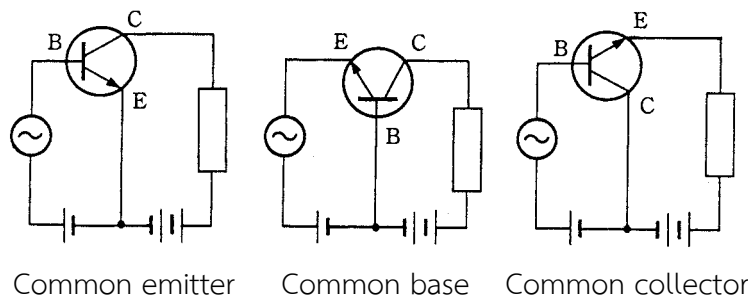
รูปที่ 1.48

1.1.6.2 วงจรขยาย

(1) วิธีต่อลงกราวด์กับวงจรขยาย

วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ Common emitter, Common base และ Common collector ขึ้นอยู่กับจะใช้ขาใดเป็นจุดร่วม หรือจุดต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 1.49 โดยทั่วไปวงจร Common emitter จะนิยมใช้กันที่สุด ตารางที่ 1.3 จะแสดงคุณสมบัติของการต่อวงจรแต่ละแบบ

อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแส Collector ΔI_C ต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส base ΔI_B หรือ $(\Delta I_C / \Delta I_B)$ ในวงจร Common emitter เรียกว่า อัตราขยายกระแส Common emitter เขียนแทนด้วย β และอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส Collector ต่อกระแส Emitter ในวงจร Common base เรียกว่า อัตราขยายกระแส Common base เขียนแทนด้วย α



รูปที่ 1.49 วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์

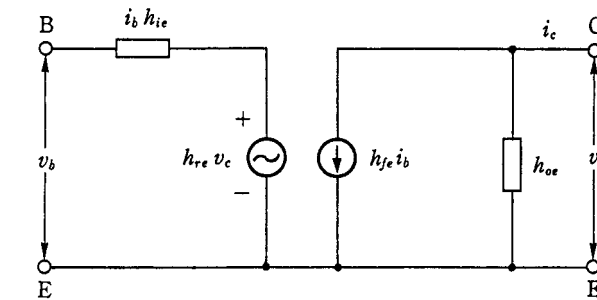
ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติของวิธีการต่อวงจรทรานซิสเตอร์แบบต่างๆ

วิธีต่อวงจร หัวข้อ	Common base	Common emitter	Common collector
อิมพีแดนซ์ขาเข้า	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
อิมพีแดนซ์ขาออก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Voltage gain	ปานกลาง	สูง	ไม่มี (≈ 1)
Current gain	ไม่มี (≈ 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 [Ω]) Voltage feedback ratio เมื่อเปิดวงจรขาเข้า (h_r) อัตราขยายกระแสเมื่อลัดวงจรขาออก (h_f) แอตมิแดนซ์ขาออกเมื่อเปิดวงจรขาเข้า (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

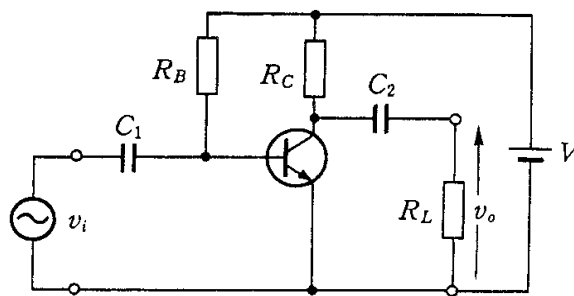
$$h_{ie} = \Delta V_{BE} / \Delta I_B, \quad h_{re} = \Delta V_{BE} / \Delta V_{CE}, \quad h_{fe} = \Delta I_C / \Delta I_B, \quad h_{oe} = \Delta I_C / \Delta V_{CE}$$

ทั้งนี้

ΔV_{BE}	คือ	การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Base กับ Emitter
ΔI_B	คือ	การเปลี่ยนแปลงกระแส Base
ΔV_{CE}	คือ	การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Collector กับ Emitter
ΔI_C	คือ	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

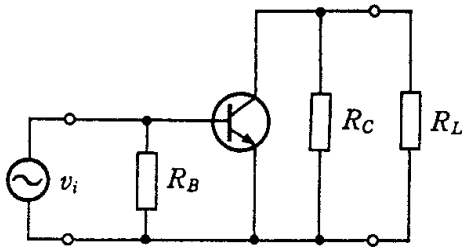


รูปที่ 1.51

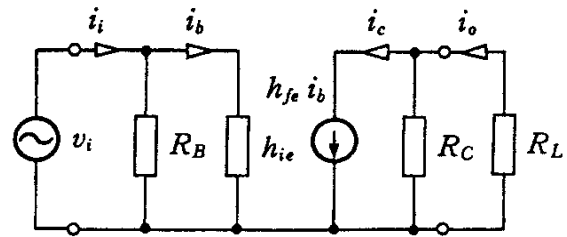
วิธีทำ : เมื่อมองจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ v_i คาปาซิเตอร์ C_1 และ C_2 จะมีความจุไฟฟ้าสถิตสูงมาก (5-100 μF) จนถือได้ว่ามีรีแอคแตนซ์น้อยมาก ดังนั้นสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับจึงเสมือนกับการลัดวงจร (ต่อตรง) นอกจากนั้น แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง V ก็พิจารณาได้ว่าเป็นการลัดวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เช่นเดียวกัน ดังนั้นในแง่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวต้านทาน R_C และ R_L จะเสมือนกับต่อขนานกันอยู่ เมื่อพิจารณาเช่นนี้แล้วจึงได้วงจรกระแสสลับดังรูปที่ 1.52 และเมื่อแปลงทรานซิสเตอร์เป็นวงจรสมมูล อย่างง่ายแล้ว จะได้รูปที่ 1.53

จากรูปที่ 1.53 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า v_i จะเท่ากับ

$$v_i = i_b \cdot h_{ie} \quad (1.25)$$



รูปที่ 1.52



รูปที่ 1.53

นอกจากนี้ เมื่อให้ความต้านทานรวมที่เกิดจากการขนานความต้านทาน R_C และ R_L เท่ากับ R'_L แล้ว

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

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

$$v_o = i_c \cdot R'_L = h_{fe} \cdot i_b \cdot R'_L \quad (1.26)$$

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]

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

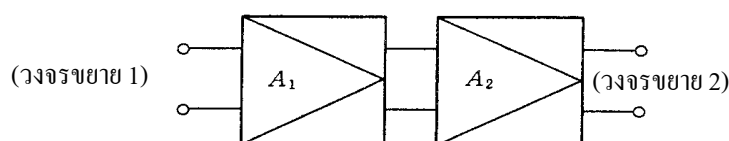
หมายเหตุ กรณีที่มีวงจรขยายต่อซ้อนกัน 2 ชั้นดังรูปที่ 1.54 ระดับการขยายรวม $A_0 = A_1 \cdot A_2$ และเนื่องจาก

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

ดังนั้น Gain รวมจึงเท่ากับ

$$G_0 = 20 \cdot \log_{10} A_1 \cdot A_2 = 20 \cdot \log_{10} A_1 + 20 \cdot \log_{10} A_2 \\ = G_1 + G_2$$

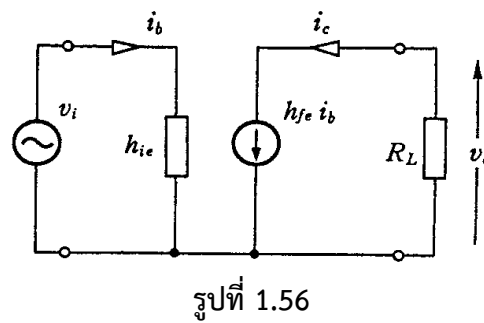
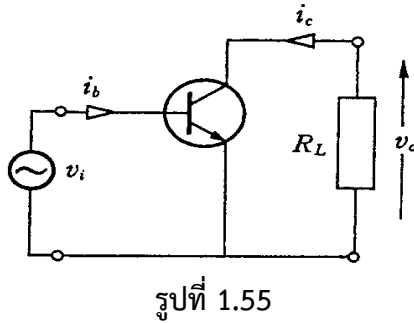
หรือเท่ากับผลบวกของ Gain ของแต่ละวงจรรวมกัน



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 [k Ω] ของวงจรนี้จะมีค่าเท่าใด ทั้งนี้ ให้ค่า h-parameter ของวงจรนี้เท่ากับ $h_{ie} = 1$ k Ω และอัตราขยายกระแส $h_{fe} = 100$

วิธีทำ : เมื่อแทนที่ทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรสมมูลอย่างง่าย จะได้รูปที่ 1.56 และคำนวณหาแรงดันขาออกและขาเข้า v_i และ v_o ได้ดังต่อไปนี้



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

ดังนั้น

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

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

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

วงจรกำเนิดสัญญาณมีหลายชนิด เช่น กำเนิดคลื่นไซน์ กำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยมกำเนิดคลื่น Pulse เป็นต้น วงจรเหล่านี้ที่จริงแล้วเป็นการประยุกต์วงจรขยาย โดยนำสัญญาณขาออกส่วนหนึ่งของวงจรขยายมาทำ Positive feedback กลับเข้ามาทางขาเข้า ดังรูปที่ 1.57

เมื่อให้อัตราขยายของวงจรขยายและวงจร feedback เท่ากับ A (V_o/V_i) และ β (V_f/V_o) แล้ว อัตราขยายรวม A_o ของทั้งบล็อกจะเท่ากับ

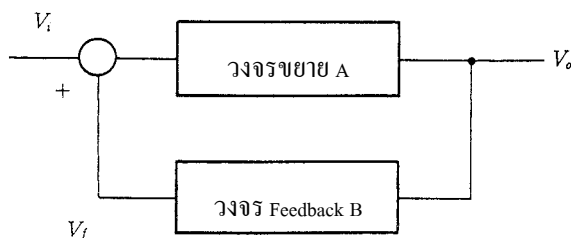
$$A_o = V_o / V_i = A / (1 - A \cdot \beta)$$

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

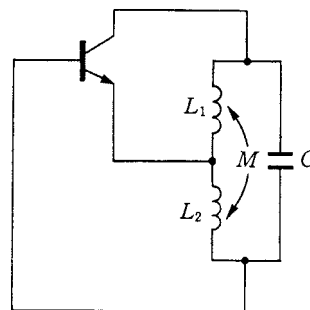
วงจรกำเนิดสัญญาณมีหลายชนิด เช่น วงจร LC วงจร CR วงจรคริสตัล เป็นต้น รูปที่ 1.58-1.60 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณ Hartley วงจรกำเนิดสัญญาณ Colpitts และวงจรกำเนิดสัญญาณ CR phase shift ตามลำดับวงจรกำเนิดสัญญาณคริสตัล จะมีโครงสร้างวงจรสมมูลกับวงจรกำเนิดสัญญาณ LC

ความถี่ของสัญญาณในแต่ละวงจรสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

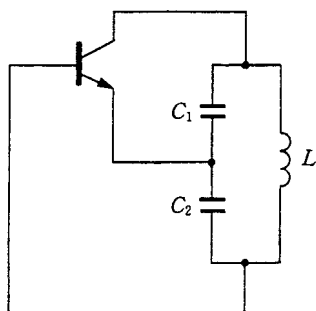
วงจรกำเนิดสัญญาณ Hartley : $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ [Hz] ทั้งนี้ $L = L_1 + L_2 - 2M$ [H]
 วงจรกำเนิดสัญญาณ Colpitts : $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ [Hz] ทั้งนี้ $C = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$ [F]
 วงจรกำเนิดสัญญาณ CR phase shift : $f = 1/(2\pi\sqrt{6}CR)$ [Hz]



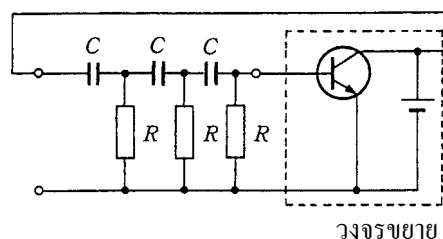
รูปที่ 1.57 Block diagram วงจรกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 1.58 วงจรกำเนิดสัญญาณ Hartley



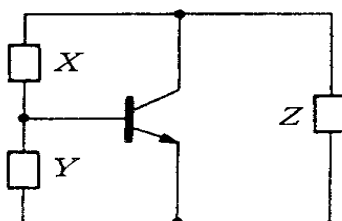
รูปที่ 1.59 วงจรกำเนิดสัญญาณ Colpitts



รูปที่ 1.60 วงจรกำเนิดสัญญาณ 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

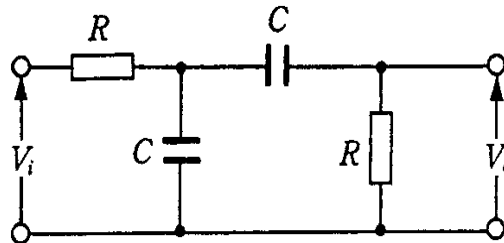


รูปที่ 1.61

ตอบ (ค)

คำอธิบาย วงจร (ค) เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ Hartley นั้นเอง

นอกจากนี้ หาก X, Y, Z เท่ากับ $X : L \quad Y : C_2 \quad Z : C_1$ 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

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

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้า V จึงแสดงได้ดังต่อไปนี้

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

และจากสูตร (1.29) สามารถคำนวณ I_2 ได้ดังต่อไปนี้

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

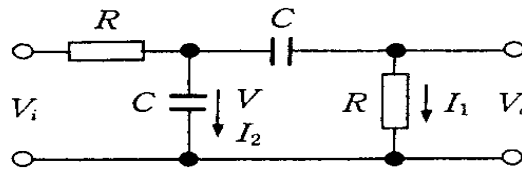
ดังนั้น V_i จึงมีค่าเท่ากับ

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

จากสมการ (1.29) (1.30) และ (1.31) จะ

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

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

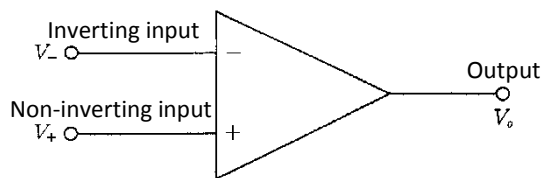
เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ใช้ในวงจรประมวลผล เช่น การบวกหรืออินทิเกรตสัญญาณ เป็น IC (วงจรรวม) ที่ประกอบด้วยวงจรขยายทรานซิสเตอร์ ตามรูปที่ 1.64 Op-amp มีสัญญาณขาเข้า 2 ขั้ว ได้แก่ Inverting input ซึ่งสัญญาณขาออกจะกลับเฟส 180° กับสัญญาณขาเข้า และ Non-inverting input ซึ่งสัญญาณขาออกจะมีเฟสตรงกับสัญญาณขาเข้า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

รูปที่ 1.65 แสดงวงจรขยายแบบ Common mode โดยป้อนสัญญาณขาเข้าที่ขั้วสัญญาณขาเข้าตรงเฟส อัตราขยาย A แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

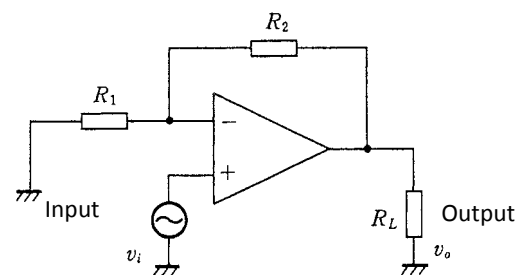
$$A = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

รูป 1.66

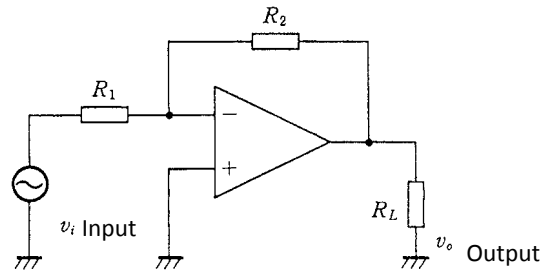
$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



รูปที่ 1.64 op-amp



รูปที่ 1.65 วงจรขยายแบบ Common mode



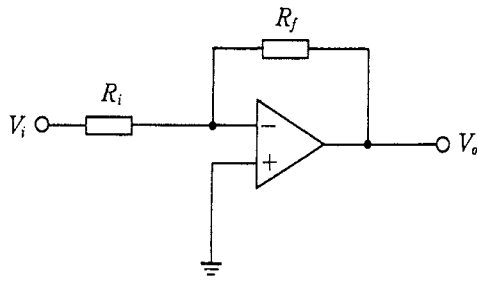
รูปที่ 1.66 วงจรขยายแบบ Common mode

ตัวอย่าง 1.18 ข้อความต่อไปนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับ Op-amp จงเลือกคำตอบหรือสูตรที่ถูกต้องจากตัวเลือกที่ให้มา เติมลงในวงเล็บ

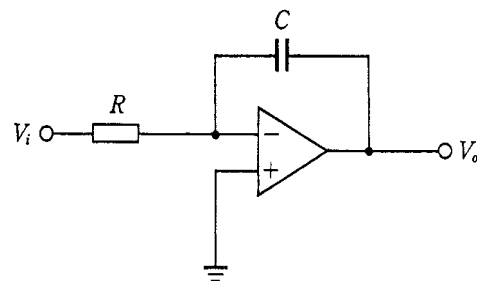
Op-amp ในอุดมคติจะถูกสมมติว่ามีคุณสมบัติพื้นฐานดังต่อไปนี้

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

เมื่อใช้ Op-amp เช่นนี้ต้องวงจรตามรูปที่ 1.67 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (V_o/V_i) จะเท่ากับ (3) และเมื่อต้องวงจรตาม 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) $V_o = -RC \frac{dV_i}{dt}$

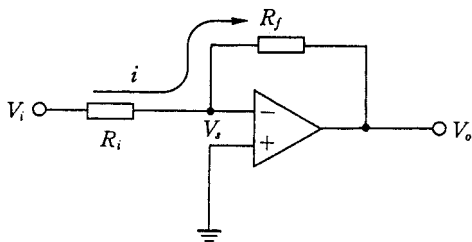
(ณ) $\frac{R_i}{R_f}$ (ญ) $-\frac{R_i}{R_f}$ (ฎ) ศูนย์ (ฏ) อัตราขยาย

กำลังไฟฟ้า (ฐ) $V_o = -\frac{R}{C} \cdot \frac{dV_i}{dt}$ (ฑ) วงจรอินทิเกรต (ฒ) $V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$

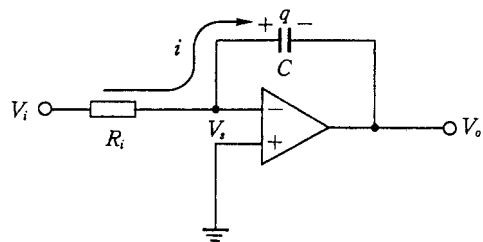
ตอบ (1)-(ฉ) (2)-(ค) (3)-(จ) (4)-(ณ) (5)-(ช)

คำอธิบาย ข้อ (1) และ (2) คุณสมบัติของ Op-amp ในอุดมคติ คือมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเป็นอนันต์ มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นอนันต์ และมีอิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์ หากอัตราขยายเป็นอนันต์ (ในทางปฏิบัติคือสูงมาก) แล้ว เมื่อทำ Negative feedback จะสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรขยายที่มีเสถียรภาพได้ และการที่อิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นอนันต์ หมายความว่าอุปกรณ์ขยายสัญญาณนี้จะทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าเท่านั้นโดยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานจึงเท่ากับศูนย์ และการที่อิมพีแดนซ์ขาออกเป็นศูนย์ หมายความว่าไม่ว่าจะนำไปขับ Load ใดๆ ก็สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ได้ กล่าวคือ สามารถขับ 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



รูปที่ 1.69



รูปที่ 1.70

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

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

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

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

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

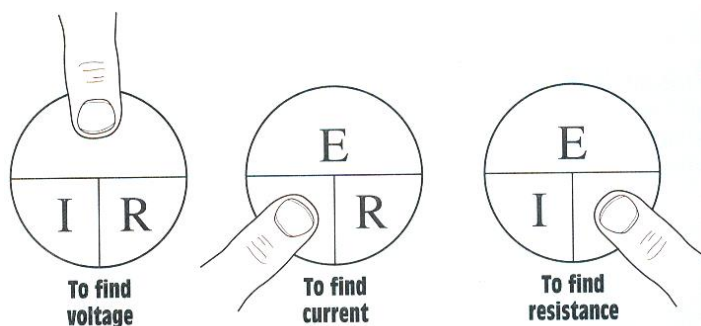
ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรอินทิเกรต

วงจรขยายที่ต่อขั้วบวกของ Op-amp ลงกราวด์ และต่อขั้วลบกับ Input เช่นในรูปที่ 1.69 และ 1.70 เรียกว่า Inverting amplifier circuit ในกรณีของวงจรเช่นนี้ V_s จะมีค่าเกือบเป็นศูนย์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงเปรียบได้กับขั้วลบต่อลงกราวด์อยู่ หากนำมาใช้เป็นเทคนิคในการคำนวณ ก็จะทำให้ง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่นในข้อ (4) เป็นต้น

1.1.7 แรงดัน กระแส กำลัง และพลังงานในระบบไฟฟ้า

จากกฎของโอห์มซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า คือ

1. แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) สัญลักษณ์ V
2. กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) สัญลักษณ์ A
3. ความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) สัญลักษณ์ Ω



รูปที่ 1.71 การหาค่าแรงดัน กระแส และความต้านทานจากกฎของโอห์ม

จากสามเหลี่ยมกล ถ้าเราต้องการหาค่าตัวใด ให้ปิดตัวที่ต้องการหาจะได้ค่าของตัวที่เราต้องการทราบ เช่น ต้องการหา E (แรงดันไฟฟ้า) ปิด E ไว้ก็จะได้

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

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

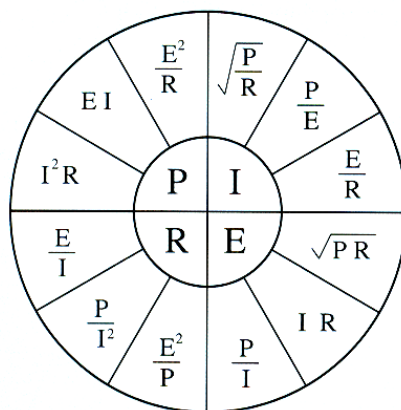
$$\text{หรือ } R = E / I \text{ (}\Omega\text{) (E ส่วนหรือหารด้วย I มีหน่วยเป็นโอห์ม }\Omega\text{)}$$

โดยกฎของโอห์มได้กล่าวถึงค่าความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า นี้ไว้ว่า

1. แรงดันไฟฟ้าขนาดหนึ่งโวลต์ หมายถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถดันกระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ให้ ไหลผ่านความต้านทานหนึ่งโอห์มไปได้
2. กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ หมายถึงค่าของกระแสไฟฟ้าสามารถดันให้ผ่านความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มไปได้

3. ความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มหมายถึงค่าความต้านทานที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ที่ถูกแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าหนึ่งโวลต์ดันให้ผ่านไปได้

การหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน ความต้านทาน และกำลังทางไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันการคำนวณเพื่อหาค่าจะต้องทราบค่าอย่างน้อย 2 ค่าจึงจะหาค่าที่ต้องการได้ ตัวอย่างเช่น ต้องการทราบค่าความต้านทาน จะต้องทราบค่าแรงดัน และกระแส หรือต้องการทราบค่ากำลังทางไฟฟ้าจะต้องทราบค่าของแรงดัน และกระแสเป็นต้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปเป็นสูตรเพื่อใช้ในการหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 1.72 สูตรที่ใช้ในการหาค่าแรงดัน กระแส ความต้านทานและกำลังไฟฟ้า

1.1.7.1 กำลังไฟฟ้า (Electric Power)

กำลังไฟฟ้า หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ไปในการทำให้เกิดเป็นพลังงานรูปต่างๆ เช่น พลังงานแสงสว่าง พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น ในระยะเวลาที่จำกัด โดยกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น วัตต์(Watt:W) โดยที่จะมีสูตรในการคำนวณ กำลังไฟฟ้างดังนี้

สูตรที่ 1 $P = E \cdot I$ (Watt)

สูตรที่ 2 $P = I^2 \cdot R$ (Watt)

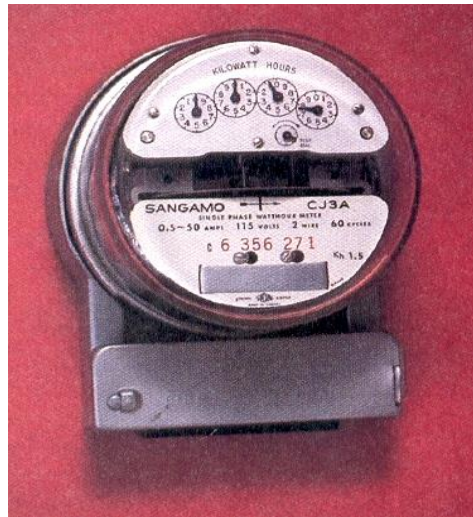
สูตรที่ 3 $P = E^2 / R$ (Watt)

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



รูปที่ 1.73 เครื่องมือวัดกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

1.1.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

1.1.8.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน คือ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นมา ค่าความต้านทานจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขบวนการผลิตตัวความทาน หน้าที่ของตัวความต้านทานที่ประกอบรวมในวงจรไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการป้อนเข้าไปเลี้ยงวงจร ถือได้ว่าตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการใช้งานวงจรไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์มาก

ตัวต้านทานแล้ว แบ่งประเภทได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ 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) พันบนแกนเซรามิก และต่อปลายลวดเข้ากับขาโลหะไว้ต่อใช้งานผิวด้านนอกเคลือบด้วยฉนวนอีกชั้นหนึ่ง สร้างออกมาแบบตัวความต้านทานคงที่ และแบบปรับค่าได้สร้างตัวต้านทานประเภทนี้มักถูกเรียกว่าตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ (Wire Wound Resister)

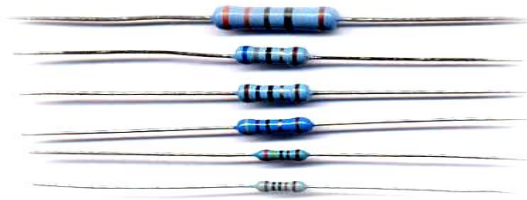
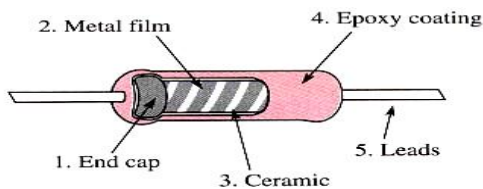
ข้อดี ของตัวต้านทานประเภทนี้ คือ สามารถสร้างให้มีค่าทนกำลังไฟฟ้า (วัตต์) ได้สูงถึงเป็นร้อยๆ วัตต์ ค่าความต้านทาน มีความคงที่ต่ออุณหภูมิ มีความคลาดเคลื่อนน้อย



รูปที่ 1.74 ตัวต้านทานแบบไวร์วาวด์ประเภททนกำลังวัตต์สูง

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

ข้อดี ของความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ คือ มีความต้านทานที่ผิดพลาดต่ำมาก เพราะใช้แสงเลเซอร์เจาะตัดเอาโลหะส่วนเกินออก แต่มีราคาแพง



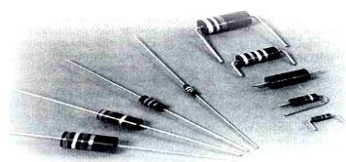
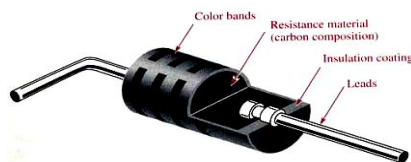
รูปที่ 1.75 ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ

(2) ตัวต้านทานประเภทโลหะ

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

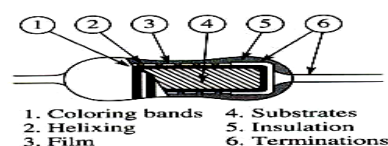
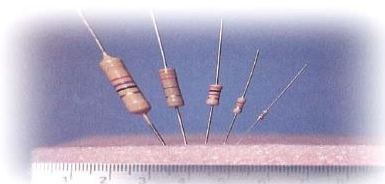
1) ตัวต้านทานแบบคาร์บอนผลิตโดยใช้ผงคาร์บอน หรือ ผงกราไฟต์ มาอัดรวมกับสารซิลิกา และกาว แล้วอัดแน่นเป็นแท่งทรงกลม มีขาตัวนำต่อเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้าง และนำไปจุ่มในสารอีพ็อกซี หรือหุ้มด้วยฉนวน ตัวต้านทานตัวเล็กจะมีค่าทนกำลังไฟฟ้าต่ำ ตัวใหญ่จะมีค่าทนกำลังไฟฟ้าสูง

ข้อเสีย ของตัวต้านทานแบบคาร์บอน คือ มีความผิดพลาดสูง และไม่สามารถนำไปใช้งานกับความถี่สูงได้ เพราะจะเกิดสัญญาณรบกวน อุณหภูมิก็มีผลกับความต้านทานแบบนี้



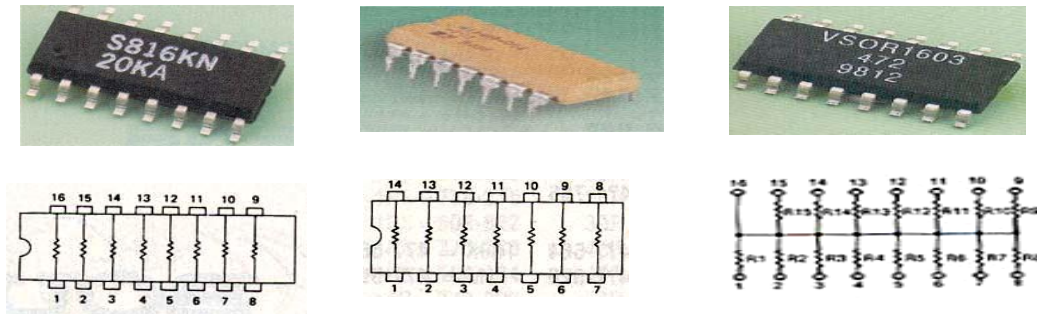
รูปที่ 1.76 ตัวต้านทานแบบคาร์บอน

2) ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน ผลิตโดยใช้ผงคาร์บอนผสมกับผงซิลิกาเคลือบหุ้มแกนเซรามิกแบบกลมชนิดเล็ก เชื่อมต่อขาตัวต้านทานทั้งสองข้างและหุ้มฉนวนปิดทับอีกชั้น คุณสมบัติของตัวต้านทานแบบนี้คล้ายกับแบบคาร์บอน



รูปที่ 1.77 ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

3) ตัวต้านทานแบบฟิล์มบางมีลักษณะการผลิตคล้ายกับแบบฟิล์มคาร์บอนใช้เทคโนโลยีเข้าช่วยสร้างขึ้นได้หลายตัวในโครงสร้างเดียวกัน ต่อเชื่อมขาออกมาภายนอกในรูปของไอซี อาจเป็นแบบตัวตะขาบ หรือแบบตั้ง นิยมนำไปใช้งานในเครื่องมือเครื่องใช้สมัยใหม่ เช่น คอมพิวเตอร์ดาวเทียม เครื่องบิน ฯลฯ

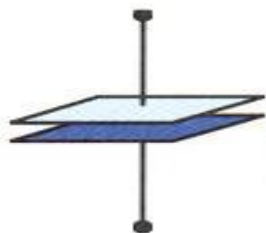


รูปที่ 1.78 รูปร่างและสัญลักษณ์ตัวต้านทานแบบฟิล์มบาง

1.1.8.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

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

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้โดยนำสารตัวนำ 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกัน ระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กตริกนี้อาจจะเป็นอากาศ ไม้ก้า พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่นๆ เป็นต้น โครงสร้าง และสัญลักษณ์ของ ตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 1.79



รูปที่ 1.79 รูปร่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

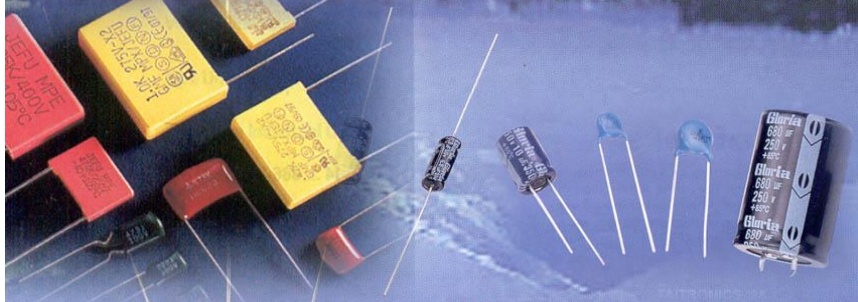
(1) ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

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

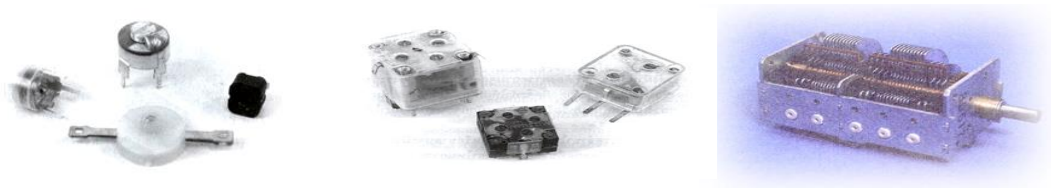
ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลม หรือเป็นทรงกระบอก ซึ่งมักแสดงค่าที่ตัวเก็บประจุ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด (μF)

การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้ จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กทริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก ชนิดเซรามิก ชนิดไมก้า เป็นต้น



รูปที่ 1.80 ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุนไดอิเล็กทริกที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 1.81 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Selected Capacitor) คือตัวเก็บประจุในตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่า ดังแสดงในรูปที่ 1.82



รูปที่ 1.82 รูปร่างของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้

(2) หน่วยความจุ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุหมายถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad) เขียนแทนด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวเอฟ (F) ตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ 1 ฟารัด หมายถึง เมื่อป้อนแรงดันจำนวน 1 โวลต์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ในเวลา 1 วินาที ให้กับแผ่นเพลททั้งสองสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 คูลอมป์

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	คือ	ค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	Q	คือ	ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์(C)
	V	คือ	แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

1.1.8.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำหรืออินดักเตอร์ (Inductor) เป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งที่มีบทบาทในการทำงานและการใช้งานทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ตัวเหนี่ยวนำสร้างขึ้นมาจากเส้นลวดตัวนำพันขึ้นมาเป็นขดลวด หรือ คอยล์ (Coil) หรือชุดของขดลวดการทำงาน และการใช้งานของตัวเหนี่ยวนำจะเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก เมื่อตัวเหนี่ยวนำถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าให้ตัวเหนี่ยวนำนั้นเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นทันที ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าให้ตัวเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเกิดการยุบตัว ตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำอีกครั้งจะได้ แรงดันไฟฟ้าออกมาจากตัวเหนี่ยวนำ ประโยชน์ดังกล่าวนี้เองทำให้ตัวเหนี่ยวนำถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง

(1) ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

ชนิดของตัวเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

1) ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอกมีชื่อเรียกแตกต่างกัน กันเช่น โซลินอยด์ เซอร์เฟสเมาส์ ไคค์ ทอร์รอยด์ และแบบแถบสี่ ฯลฯ เป็นต้น



รูปที่ 1.83 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่

2) ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุ ค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุนที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออกเพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาจนสุดค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมากจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับ

ควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติกหรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็ก และมีผลต่อค่าความความเหนี่ยวนำได้



รูปที่ 1.84 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้

(2) หน่วยของค่าความเหนี่ยวนำ

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

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

การก่อสร้างอาคารทุกหลังจะต้องทำตามพระราชบัญญัติและกฎข้อบังคับของการก่อสร้างระดับชาติ และระดับท้องถิ่น กฎข้อบังคับเหล่านี้มีไว้เพื่อให้ขณะการก่อสร้างอาคารมีความปลอดภัยต่อคนงานก่อสร้าง และผู้สัญจรไปมา และหลังจากสร้างเสร็จต้องให้ความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร เนื่องจากการป้องกันไฟไหม้เป็นเรื่องที่สำคัญมาก

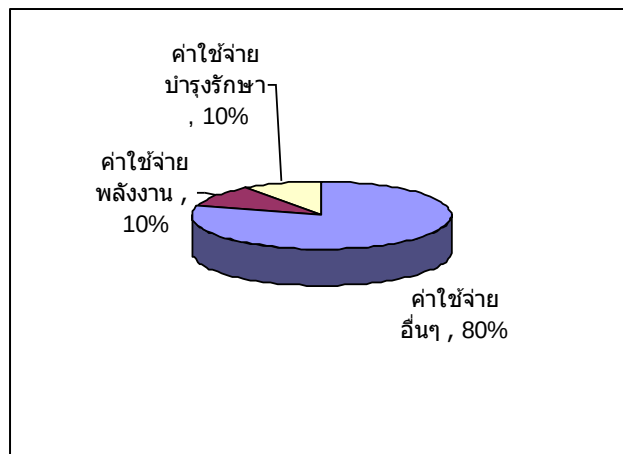
สำหรับการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้านั้น มีข้อแนะนำและข้อกำหนดอยู่มากมาย เช่น

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

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

1.2.1 การใช้ไฟฟ้าในอาคาร

โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานในอาคารมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 10 ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคาร ทั้งหมด ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าจ้าง ค่าภาษี และค่าบุคลากรแต่เราสามารถลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้โดยการประหยัดพลังงาน ในขณะที่ค่าใช้จ่ายอื่นๆ มักจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ยากจะควบคุม นอกจากนี้การประหยัดพลังงานซึ่งเป็นการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็จะลดลงด้วย



ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม

ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

รูปที่ 1.85 สัดส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคาร

รูปที่ 1.85 สัดส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของอาคารอาคารแต่ละประเภทจะใช้ไฟฟ้ามากกว่าความร้อน โดยใช้ในระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปั้มน้ำ ลิฟต์ บันไดเลื่อน อุปกรณ์สำนักงาน และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

ตารางที่ 1.4 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนในอาคารประเภทต่างๆ

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

ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม

ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

สัดส่วนการใช้พลังงานของระบบต่างๆ นั้นจะแตกต่างกันในแต่ละประเภทของอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 1.4 ระบบปรับอากาศ และแสงสว่างมีสัดส่วนในการใช้ไฟฟ้ามาก โดยมีสัดส่วนรวมกันสูงถึงร้อยละ 80 ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร ส่วนที่เหลือร้อยละ 15-20 จะถูกใช้ในระบบอื่นๆ ได้แก่ ปั๊มน้ำ ลิฟต์ บันไดเลื่อน ตู้แช่เย็น อุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น ส่วนพลังงานความร้อน จะถูกใช้สำหรับหุงต้ม ผลิตไอน้ำ น้ำร้อนเพื่อการซักล้าง ริดผ้า และอบนึ่งฆ่าเชื้อโรคของอุปกรณ์หรือเครื่องมือแพทย์ในโรงพยาบาล

ตารางที่ 1.5 สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในอาคารประเภทต่างๆ 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

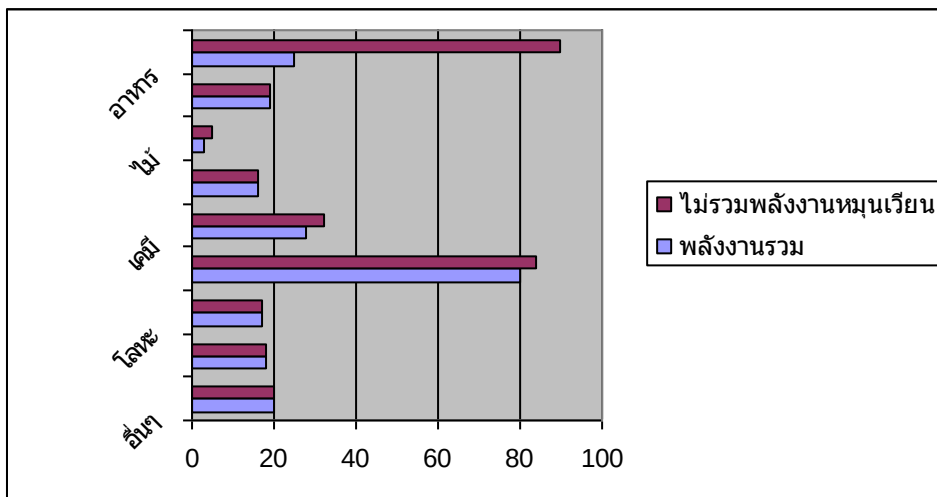
ที่มา : กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม
ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2544

1.2.2 การใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

การใช้พลังงานในโรงงานมีลักษณะที่แตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรมโดยอุตสาหกรรมถูกแบ่งออกเป็น 9 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. อาหารและเครื่องดื่ม
2. สิ่งทอ
3. ไม้
4. กระดาษ
5. เคมี
6. โลหะ
7. โลหะขั้นพื้นฐาน
8. ผลิตภัณฑ์โลหะ
9. อื่นๆ (เครื่องประดับ , อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น)

ปริมาณการใช้พลังงานโดยภาพรวมของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แสดงดังรูปด้านล่าง โดยที่อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม มีการใช้พลังงานมากที่สุด และเป็นพลังงานหมุนเวียนเป็นส่วนใหญ่ อุตสาหกรรมโลหะมีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับสอง แต่ถ้าไม่รวมพลังงานหมุนเวียน โลหะเป็นประเภทอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 1.86 ปริมาณการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

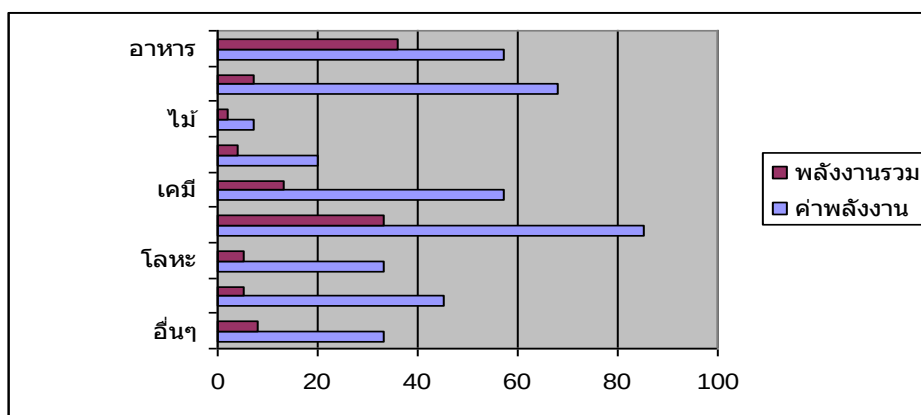
ตารางที่ 1.6 แสดงสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ แบ่งตามการใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้า

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

การใช้พลังงานในโรงงานจะอยู่ในรูปพลังงานความร้อน และไฟฟ้า สัดส่วนของการใช้พลังงานความร้อน และไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม

จากตารางที่ 1.6 จะเห็นว่าโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้พลังงานความร้อนเป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามควรให้ความสำคัญกับพลังงานไฟฟ้าเช่นกันเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีราคาแพงที่สุด ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1.87 ด้านล่าง ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอ และโลหะมีปริมาณการใช้พลังงานรวมไม่มาก แต่อุตสาหกรรมเหล่านี้ใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าพลังงานความร้อน ทำให้มีค่าใช้จ่าย พลังงานสูง



รูปที่ 1.87 ค่าใช้จ่ายพลังงานของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

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

1.3.1 โครงสร้างค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้า ถือว่าเป็นต้นทุนสำคัญที่สุดในการประกอบกิจการโรงแรม การลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลง จึงเป็นการเพิ่มกำไรโดยตรงในการประกอบการ ดังนั้นก่อนที่จะวางแผนอนุรักษ์พลังงานด้านอื่นในโรงแรม ผู้บริหารหรือผู้รับผิดชอบด้านพลังงานควรวางแผนจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าใน โรงแรมก่อน เนื่องจากการจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า จะนำไปสู่การ วางแผน และควบคุมการใช้ เครื่องจักรอุปกรณ์ไฟฟ้า และแสงสว่างอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าให้น้อยที่สุด และก่อนที่จะทำการวางแผนจัดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า ควรจะทำความเข้าใจหลักการคิดคำนวณค่าไฟฟ้า ดังนี้

1.3.1.1 ประเภทของอัตราค่าไฟฟ้า

ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 7 ประเภท ตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าได้แก่

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

ประเภทที่ 3 : กิจการขนาดกลาง

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

อัตราค่าไฟฟ้าปกติ

ประเภท	ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย
3.1.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	175.70	3.1355
3.1.2 แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	196.26	3.1729
3.1.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	221.50	3.2009

อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff: TOU Tariff)

ประเภท	ค่าความต้องการ กำลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย		ค่าบริการ บาท/เดือน
		1*	2*	
3.2.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์	74.14	4.1283	2.6107	312.24
3.2.2 แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	132.93	4.2097	2.6295	312.24
3.2.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210.00	4.3555	2.6627	312.24

- 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

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

อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of Day Tariff: TOD Tariff)

ประเภท	ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์			ค่าพลังงานไฟฟ้า บาท/หน่วย
	1*	2*	3*	
4.1.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	224.30	29.91	0	3.1355
4.1.2 แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	285.05	58.88	0	3.1729
4.1.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	332.71	68.22	0	3.2009

- 1* On Peak : เวลา 18.30-21.30 น. ของทุกวัน
 2* Partial Peak : เวลา 08.00-18.30 น. ของทุกวัน
 คิดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่เกินจากช่วง On Peak
 3* Off Peak : เวลา 21.30-08.00 น. ของทุกวัน ไม่คิดค่าความต้องการ
 กำลังไฟฟ้า

อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff: TOU Tariff)

ประเภท	ค่าความต้องการ กำลังไฟฟ้า บาท/กิโลวัตต์	ค่าพลังงานไฟฟ้าบาท/ หน่วย		ค่าบริการ บาท/เดือน
		1*	2*	
4.2.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์	74.14	4.1283	2.6107	312.24
4.2.2 แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	132.93	4.2097	2.6295	312.24
4.2.3 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210.00	4.3555	2.6627	312.24

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) ซึ่งขอใช้ไฟฟ้าก่อนเดือนพฤศจิกายน 2558 จะถูกจัดอยู่ในอัตราประเภท 4.1 (TOD Tariff ใหม่)

2. ผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในอัตราประเภท 4.2 (TOU Rate เดิม) ซึ่งขอใช้ไฟฟ้าก่อนเดือนพฤศจิกายน 2558 จะถูกจัดอยู่ในอัตราประเภท 4.2 (TOU Tariff ใหม่)

3. ผู้ขอใช้ไฟฟ้ายี่ห้อใหม่ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้า เฉลี่ยใน 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 แม้ว่าต่อมาจะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดต่ำกว่า 1,000 กิโลวัตต์ และมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือนก็ตามนอกจากจะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ ติดต่อกันเป็นเวลา 12 เดือน หรือได้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้ไฟฟ้า

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

1.3.2 ตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า

		(1) ประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า			
		รายละเอียดเพิ่มเติม (เดือนปัจจุบัน)		30002570007070134711227386000745	
ประเภท	4.2.2	ตัวคูณ	1000	อัตราค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft.)	ท 21.95 สต./หน่วย
ค่าพลังงานไฟฟ้า			8,433,851.94 บาท	จำนวน 1*	1,801,000 หน่วย
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า				จำนวน 2*	3,005,000
** 61.97% OF			1,003,887.00	จำนวน 1*	7,552 กิโลวัตต์
เพาเวอร์แฟคเตอร์	7,552 kW				7,468
ค่าบริการ			228.17		3,923 กิโลวาร์
(รวมค่าไฟฟ้าและค่าบริการ)			9,437,967.11		
ค่า FT (เพิ่ม/ลด)	ท		1,054,917.00		
ส่วนลด			-		
ค่าไฟฟ้ารวม			10,492,884.11		
ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%			734,501.89		
รวมเงิน			11,227,386.00		
รวมเงินที่ต้องชำระสุทธิ		11,227,386.00 บาท		67 497 25	
				วงเงินทบทวนประโยชน์	

1.3.2.1 ส่วนประกอบของค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้าคิดคำนวณจากส่วนประกอบของค่าไฟ ซึ่งมีทั้งส่วนที่สามารถควบคุมได้ คือ

- (1) ค่าพลังงานไฟฟ้า (2)
- (2) ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (3)
- (3) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (4)

และส่วนที่ไม่สามารถควบคุมได้ คือ

- (1) ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (ค่า Ft)
- (2) ค่าบริการ
- (3) ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม (ขึ้นอยู่กับค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมดในแต่ละเดือน)

การลดค่าไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาบริหารจัดการส่วนประกอบของค่าไฟที่สามารถควบคุมได้ดังต่อไปนี้ (ดูตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟประกอบ)

- (1) ค่าพลังงานไฟฟ้า (2)

คือ ค่าธรรมเนียม (บาท) ที่คิดจากจำนวนความต้องการกำลังไฟฟ้าในหนึ่งเดือนคูณด้วยค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราที่แตกต่างกันตามประเภทผู้ใช้ไฟ (1)

- (2) ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (3)

คือ ค่าธรรมเนียม (บาท) ที่คิดจากอัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (ตามประเภทของผู้ใช้) คูณด้วยจำนวนความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand :7) ที่ตรวจวัดได้ในทุกช่วง 15 นาทีระหว่างเวลา On Peak ของรอบเดือนนั้น โดยจะตรวจวัด 4 ครั้งในทุกชั่วโมงตลอดเดือน แต่จะคิดค่าไฟฟ้าจากจำนวนความต้องการไฟฟ้าที่สูงสุดในรอบเดือนเท่านั้น หากจำนวนความต้องการไฟฟ้ามีเศษไม่ถึง 0.5 กิโลวัตต์จะตัดเศษทิ้ง แต่หากจำนวนความต้องการไฟฟ้ามีเศษตั้งแต่ 0.5 กิโลวัตต์ขึ้นไป คิดเป็น 1 กิโลวัตต์

- (3) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (4)

คือ ค่าธรรมเนียม(บาท)ที่คิดจากค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (8) หากเกินกว่าร้อยละ 61.97 ของปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand:7) จะต้องเสียค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ในอัตรา กิโลวาร์ละ 14.02 บาท เศษของกิโลวาร์ ถ้าไม่ถึง 0.5 กิโลวาร์ตัดทิ้ง เศษตั้งแต่ 0.5 กิโลวาร์ขึ้นไป คิดเป็น

1 กิโลวาร์ ในกรณีตัวอย่างใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้าข้างต้น ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เท่ากับ 3,923 กิโลวาร์ ซึ่งไม่เกินร้อยละ 61.97 ของปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้า (61.97% ของ 7,552 kW เท่ากับ 4,679.97) จึงไม่เสียค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

ราคาค่าไฟฟ้าเกิดขึ้นจากหลายองค์ประกอบ ซึ่งเกี่ยวกับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าความต้องการกำลัง(พลัง)ไฟฟ้าสูงสุด ก่อนที่จะลดค่าไฟฟ้าให้ต่ำที่สุด

ราคาค่าไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ตั้งแต่ 30 kW ขึ้นไปแต่ไม่เกิน 2000 kW ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าจะอยู่ในประเภทที่ 3 หรือ เกิน 1000 kW ในประเภทที่ 4 ตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้า ใบเสร็จค่าไฟฟ้าจะกำหนดให้มีการชำระเป็นรายเดือน โดยจะมีการระบุถึงองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนหลักดังนี้

- (1) ราคากำลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์-ชม.)
- (2) ราคาค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (บาท/กิโลวัตต์/เดือน)
- (3) ราคาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จะต้องจ่าย

ราคาค่าใช้จ่ายขององค์ประกอบดังกล่าวจะผันแปรขึ้นอยู่กับ

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

ราคาค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

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

ราคากำลังงานไฟฟ้า

- (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% ของค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า กิโลวัตต์ สูงสุดในเดือนนั้น
- (2) ราคา 14.02 บาท/กิโลวาร์ ที่เกินต่อเดือน

ราคาทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม

1.3.2.2 อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (demand) คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานเฉลี่ยในช่วง 15 นาที ที่มีค่าสูงสุดในรอบ 1 เดือน และมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์

ตัวอย่าง 1.19 จากข้อมูลที่ได้จาก Kilowatt-hour meter ของโรงงานซึ่งในช่วง 15 นาที ปรากฏค่าดังนี้ อ่านค่าครั้งแรก 15,000 kWh และอ่านค่าครั้งหลัง 15,200 kWh จงหาค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าช่วงนี้

$$\begin{aligned}\text{ความต้องการกำลังไฟฟ้า} &= \text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้(15 นาที)} \times 4 \\ &= (15,200 - 15,000) \times 4 \\ &= 800 \text{ kWh}\end{aligned}$$

ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในรอบเดือนคือค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.3.3 ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (Ft)

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

การคิดเงินค่า Ft คำนวณจากจำนวนหน่วยที่ใช้ คูณด้วยราคาค่า Ft ต่อหน่วยของเดือน นั้นๆ ค่า Ft ที่เรียกเก็บในแต่ละเดือนจะเรียกเก็บกับผู้ไฟฟ้าทุกประเภท และทุกหน่วยของการใช้ในอัตราเดียวกัน โดยการไฟฟ้าจะแสดงราคาค่า Ft เป็นสตางค์ต่อหน่วย และจำนวนเงินค่า Ft เป็นบาท ไว้ในใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้า

การกำหนดค่า Ft คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) ซึ่งมีฯพณฯ นายกรัฐมนตรี เป็นประธาน ได้อนุมัติให้นำสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติมาใช้ ตั้งแต่การปรับปรุงโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าฐานเมื่อ 1 ธันวาคม 2534 โดยมีผลตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2534 และได้กำหนดให้คณะกรรมการพิจารณานโยบายพลังงาน (กพง.) ซึ่งมีรัฐมนตรีประจำสำนักนายกรัฐมนตรี เป็นประธาน ทำหน้าที่ควบคุมดูแล ซึ่งได้มีการแต่งตั้งคณะกรรมการกำกับสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ประกอบด้วยผู้แทนจาก สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง กรมบัญชีกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย หอการค้าไทย สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีหน้าที่กำกับดูแลการกำหนด วิธีการคำนวณ และให้ความเห็นชอบการคำนวณค่า Ft ตามสูตรที่ได้รับความเห็นชอบจาก กพง.เป็นประจำทุกเดือน และเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2539 คณะกรรมการพิจารณานโยบายพลังงาน (กพง.) ได้มีมติเห็นชอบให้มีการปรับค่า Ft 4 เดือนต่อครั้ง เพื่อมิให้มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยจนเกินไป ทำให้ผู้ประกอบการสามารถวางแผนการผลิต การจำหน่ายสินค้า และการบริการได้ง่ายขึ้น

1.4 ตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าแบบต่างๆ และการควบคุมค่าไฟฟ้า (Calculation of electricity cost and control of electricity cost)

1.4.1 ตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าแบบต่างๆ

1.4.1.1 อัตราปกติ

ข้อมูล	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	3.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	12 kV
	ความต้องการกำลังไฟฟ้า	205 kW
	พลังงานไฟฟ้า	48,800 kWh
	ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	250 kVAr
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2552

การคำนวณ	
1. ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	= 205×196.26
	= 40,233.30 บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	= $48,800 \times 1.7034$
	= 83,125.92 บาท
4. ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	= จำนวน kVAr ที่เกินกว่า 61.97% ของ kW Demand
	= $250 - 0.6197 \times 205 = 123$
	$123 \times 14.02 = 1,724.46$ บาท
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft)	= $48,800 \times 0.00$
	= 0.00 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	= $40,233.30 + 83,125.92 + 1,724.46 + 0.00$
	= 125,083.68 บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	= $125,083.68 \times 0.07$
	= 8,755.86 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	= $125,083.68 + 8,755.86$
	= 133,839.54 บาท

1.4.1.2 อัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD)

ข้อมูล	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	4.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	22kV
	ความต้องการกำลังไฟฟ้า	
	ช่วง ON PEAK	1,460 kW
	ช่วง PARTIAL PEAK	1,575 kW
	ช่วง OFF PEAK	1,420 kW
	พลังงานไฟฟ้า	978,000 kWh
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft)	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2552

การคำนวณ	
1. ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	$(1,460 \times 285.05) + [(1,575 - 1,460) \times 58.88]$ = 422,944.20 บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	$= 978,000 \times 1.7034$ = 1,665,925.20 บาท
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft)	$= 978,000 \times 0.00$ = 0.00 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	$= 422,944.20 + 1,665,925.20 + 0.00$ = 2,088,869.40 บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	$= 2,088,869.40 \times 0.07$ = 146,220.86 บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	$= 2,088,869.40 + 146,220.86$ = 2,235,090.26 บาท

1.4.1.3 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

ข้อมูล	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	4.2	
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	24 kV	
	ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้า	ความต้องการกำลังไฟฟ้า (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
	ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	2,700 kVAr	
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh	
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	ตุลาคม 2552	

การคำนวณ	
1. ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	$= 7,500 \times 132.93$ $= 996,975.00$ บาท
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า	$= (1,638,000 \times 2.6950) + (2,104,600 \times 1.1914)$ $= 6,921,830.44$ บาท
3. ค่าบริการ	$= 228.17$ บาท
4. ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	$=$ จำนวน kVAr ที่เกินกว่า 61.97% ของ kW $= 2,700 - 0.6197 \times 7,500 = 0.00$
6. ค่าไฟฟ้าตามการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft)	$= (1,638,000 + 2,104,600) \times 0.00$ $= 0.00$ บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า	$= 996,975.00 + 6,921,830.44 + 228.17 + 0.00 + 0.00$ $= 7,919,033.61$ บาท
7. ภาษีมูลค่าเพิ่ม	$= 7,919,033.61 \times 0.07$ $= 554,332.35$ บาท
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	$= 7,919,033.61 + 554,332.35$
	$= 8,473,365.96$ บาท

1.4.2 การควบคุมค่าไฟฟ้า

แนวทางในการลดค่าไฟฟ้าเบื้องต้นนี้ จะเป็นแนวทางที่อ้างอิงตามรูปแบบอัตราค่าไฟฟ้าในหัวข้อที่ 1.4

กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราปกติ (อัตราค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน)

คือ เสียเฉพาะค่าพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากค่าไฟฟ้ามีเฉพาะส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวการลดค่าไฟฟ้าจะทำให้จำเป็นต้องอาศัยหลักการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสีย

การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า

- ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพิ่มให้สูงขึ้นได้โดยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง
- ประสิทธิภาพของการใช้งานเพิ่มให้สูงขึ้นได้ โดยการเปิดใช้งานที่จำเป็น และใช้งานอย่างเหมาะสม

ตัวอย่าง เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในระบบแสงสว่างทำได้โดย

1. เลือกใช้หลอดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง (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 หลากๆ วิธีผสมผสานกัน เช่น อาจมีการใช้เครื่องตั้งเวลา สวิตช์แสง ระบบควบคุมอัตโนมัติ เป็นต้น

กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราปกติ (อัตราค่าไฟฟ้าแบบ 2 ส่วน)

เนื่องจากค่าไฟฟ้าประกอบด้วย ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้า โดยค่าไฟฟ้าทั้งสองส่วนนี้เป็นแบบอัตราคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้งาน ดังนั้นแนวทางการลดค่าไฟฟ้าจึงต้องดำเนินการ 2 แนวทางคือ

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน
2. ใช้ไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะทำให้เกิดค่า

ความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand Charge) สูง ซึ่งทำได้โดยการหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องจักร อุปกรณ์ พร้อมๆ กันในเวลาเดียวกัน

ความต้องการกำลังไฟฟ้าทุกๆ 1 กิโลวัตต์ที่เพิ่มขึ้น อาจจะต้องเสียค่าไฟเพิ่มขึ้นอีก 196.26 บาทบวก VAT อีก 7% (210 บาทต่อกิโลวัตต์)

กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD)

ผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้ จะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าในอัตราคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่จะเสียค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าโดยขึ้นกับช่วงเวลาของวัน กล่าวคือ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าในช่วง 18:00 น. - 21:30 น. จะมีราคาแพงที่สุด แต่ในช่วงเวลา 21:30 น. - 08:00 น. ไม่ต้องเสียค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ดังนั้น แนวทางการลดค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้สามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง ดังนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้ากลุ่ม 1 ส่วน
2. หลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าแพง คือ ช่วง 18:00 น. - 21:30 น. ของทุกวัน และเพิ่มการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าถูกหรือไม่ต้องเสียค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า คือ ช่วงเวลา 21:30 น. - 08:00 น. ของทุกวัน ในช่วงเวลาที่ต้องเสียค่าความต้องการไฟฟ้า จะต้องใช้ไฟอย่างสม่ำเสมอ การหลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีค่าความต้องการไฟฟ้าแพงอาจทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - ย้ายโหลตไปเดินในช่วงเวลาอื่นแทน
 - บั่นไฟตัวเอง เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าฯ
 - หากเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าที่ทำงานเพียงวันละ 2 กะ ให้แยกเวลาทำงานระหว่างกะ ตอน ช่วงเวลา 18:00 น. ถึง 21:30 น. แทน
 - ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแทนระบบปกติ เช่น ใช้ระบบปรับอากาศแบบ Ice Storage เพื่อผลิตน้ำแข็งตอนกลางคืน แล้วดึงความเย็นไปใช้ตอนกลางวัน หรือผลิตน้ำแข็งตอนกลางวัน แล้วดึงความเย็นไปใช้ตอนหัวค่ำ เป็นต้น

กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่เสียค่าไฟฟ้าตามอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

ผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้ จะเสียค่าความต้องการไฟฟ้าในอัตราคงที่ โดยคิดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉพาะความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างเวลา 09:00 น. - 22:00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์เท่านั้น ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้านั้น จะเสียในอัตราตามช่วงเวลาของการใช้กล่าวคือ หากใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลา 09:00 น. - 22:00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์จะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าแพงสุด โดยการใช้ไฟฟ้า ในช่วงกลางคืนของวันจันทร์ถึงวันศุกร์ระหว่างเวลา 22:00 น. - 09:00 น. และวันเสาร์ - อาทิตย์ และวันหยุดราชการตามปกติทั้งวันจะเสียค่าพลังงานไฟฟ้าถูกกว่า ดังนั้นผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มนี้จึงควรใช้แนวทางการลดค่าไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า โดยดำเนินการเหมือนกับกลุ่มผู้เสียค่าไฟฟ้าแบบ 1 ส่วน
2. การใช้ไฟฟ้าในช่วงที่ต้องเสียค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า จะต้องใช้ไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด สูงเกินควร
3. หลีกเลี่ยงหรือลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าแพง (ช่วง 09:00 น. - 22:00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์)
4. ปรับกิจกรรมการทำงานใหม่ โดยเพิ่มกิจกรรมในช่วงกลางคืนถึงตอนเช้า (22:00 น. - 09:00 น. ของจันทร์ถึงวันศุกร์) ให้มากขึ้น พร้อมทั้งเพิ่มกิจกรรมในวันเสาร์ - วันอาทิตย์ และวันหยุดราชการตามปกติ ซึ่งมีค่าพลังงานไฟฟ้าถูกเท่ากับช่วงกลางคืน

สรุป

การกำเนิดแรงดันไฟฟ้านั้นมีแหล่งขึ้นได้ 7 วิธีด้วยกันได้แก่ การเสียดสี (Friction) แรงกดดัน (Pressure) ความร้อน (Heat) แสงสว่าง (Light) ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Action) อำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) และปฏิกิริยา

การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมและขับนำสวิตช์ และวงจรทั้งหมดสามารถแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก เราเรียกว่า “วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง” วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำการแปลงผันพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมปริมาณขาออก เช่น ขนาดของแรงดันและความถี่ได้โดยสะดวก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำงานที่ความถี่สูงจึงมีขนาดเล็กกะทัดรัดและเบา

ข้อเสีย ของอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็มี อาทิเช่น วงจรทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ และออกแบบแล้วยังมีปัญหาความเชื่อถือได้ของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ ตลอดจนปัญหาอันเนื่องมาจากการสวิตช์ ซึ่งได้แก่ การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI)

จากกฎของโอห์มซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า คือ

1. แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt) สัญลักษณ์ V
2. กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) สัญลักษณ์ A
3. ความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) สัญลักษณ์ Ω

กำลังไฟฟ้า หมายถึง กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ไปในการทำให้เกิดเป็นพลังงานรูปต่างๆ เช่น พลังงานแสงสว่าง 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 ความเที่ยงตรงในที่นี้หมายถึงความถูกต้อง และสามารถทำซ้ำได้ดี ความถูกต้องของการวัด หมายถึง ขนาดของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง ความสามารถในการทำซ้ำได้ หมายถึง ค่าอัตราส่วนของความไม่สม่ำเสมอของค่าที่วัดได้ที่แสดงเป็น % ซึ่งมีความหมายเหมือนกับความเที่ยงตรง

1.5 กิจกรรม (Activity)

1. จงหาค่าของกำลังไฟฟ้าง่ายๆต่อไปนี้ โดยใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า ดังกล่าวเป็นระยะเวลา 1 เดือน จะต้องสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้ากี่ยูนิต และจะต้องเสียค่าไฟฟ้าจำนวนเท่าไร (ถ้าให้ค่าไฟฟ้า ยูนิตละ 2 บาท)

- 1.1 เตารีดไฟฟ้า 750 วัตต์ ใช้ 3 ชั่วโมงต่อวัน
- 1.2 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า 600 วัตต์ ใช้ 1 ชั่วโมงต่อวัน
- 1.3 เต้าไฟฟ้า 1,000 วัตต์ ใช้ 5 ชั่วโมงต่อวัน
- 1.4 พัดลม 100 วัตต์ ใช้ 10 ชั่วโมงต่อวัน

2. ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือในการวัดสิ่งที่เราต้องการทราบในวงจรไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์คืออะไรบ้าง

3. เพราะเหตุใดเราจึงต้องมีการศึกษาถึงลักษณะการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารหรือโรงงาน

4. ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็นกี่ประเภทโดยที่เราคิดตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละแห่ง

5. ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ สามารถแยกประเภทของกำลังไฟฟ้าออกเป็นกี่ประเภทด้วยกัน

6. ค่า Ft คือค่าอะไร

7. การคิดค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ โดยมีข้อมูลดังด้านล่างนี้ จงหาเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)

2.1.1.1.1 ข้อมูล	ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	3.1
	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	< 12 kV
	ความต้องการกำลังไฟฟ้า	230 kW
	พลังงานไฟฟ้า	50,000 kWh
	ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	270 kVAr
	การปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	0.00 สตางค์ / kWh
	ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	พฤศจิกายน 2558

เฉลยกิจกรรม

(1)

$$\begin{aligned}
 1.1 \text{ เตาไรต์ไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (750 \times 3) / 1,000 \\
 &= 2.25 \text{ ยูนิต / วัน} \\
 &= 2.25 \times 30 \text{ วัน} \\
 &= 67.5 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\
 1.2 \text{ หม้อหุงข้าวไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (600 \times 1) / 1,000 \\
 &= 0.6 \text{ ยูนิต / วัน} \\
 &= 0.6 \times 30 \text{ วัน} \\
 &= 18 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\
 1.3 \text{ เตาไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (1,000 \times 5) / 1,000 \\
 &= 5 \text{ ยูนิต / วัน} \\
 &= 5 \times 30 \text{ วัน} \\
 &= 150 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\
 1.4 \text{ พัดลมไฟฟ้าคิดเป็นยูนิต} &= (100 \times 10) / 1,000 \\
 &= 1 \text{ ยูนิต / วัน} \\
 &= 1 \times 30 \text{ วัน} \\
 &= 30 \text{ ยูนิต / 1เดือน} \\
 \text{รวมยูนิต / เดือน} &= 67.5 + 18 + 150 + 30 \\
 &= 265.5 \text{ ยูนิต}
 \end{aligned}$$

คิดเป็นเงินที่ต้องชำระค่าไฟฟ้าใน 1 เดือน (ยูนิตละ 2 บาท)

$$= 265.5 \times 2$$

$$\text{จะต้องจ่ายค่าไฟฟ้าทั้งสิ้น} = 531 \text{ บาท / เดือน}$$

(2)

การเลือกใช้เครื่องวัดที่มีความเหมาะสมต่อสิ่งที่เราจะหา รวมทั้งก่อนการวัดควรเลือกตั้งย่านของมิเตอร์ในย่านที่สูงๆ ไว้ก่อนแล้วจึงค่อยทำการปรับลดลงมาทีหลังเพื่อความสะดวกในการอ่านค่า และต่อข้อบกพร่องและลบ ให้ถูกต้อง

(3)

เพราะเราสามารถลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้โดยการประหยัดพลังงาน ในขณะที่ค่าใช้จ่ายอื่นๆ มักจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ยากจะควบคุม นอกจากนี้การประหยัดพลังงานซึ่งเป็นการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็จะลดลงด้วย

(4)

ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็น 7 ประเภทด้วยกันโดยที่เราคิดตามขนาดของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละแห่งคือ

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

(5)

เราสามารถแยกประเภทของกำลังไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภทคือ

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

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

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

(6)

ค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ มีค่าเป็นสตางค์ต่อหน่วยเป็นค่า ไฟฟ้าผันแปรที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทุกๆ 4 เดือน ซึ่งจะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายที่ การไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผน ผลกระทบของอัตราแลกเปลี่ยน (FOREX) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผน และอัตราเงินเฟ้อ เป็นต้น โดยค่า F_t จะแยกตามกิจการ ได้แก่ กิจการผลิต กิจการระบบส่ง กิจการระบบจำหน่าย และกิจการค้าปลีก

(7)

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

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญยศักดิ์ ใจจงกิจ, ไฟฟ้าเบื้องต้น. ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [2] Power Tech Group , การส่งจ่ายและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ที่ พิสิษฐ์เซ็นเตอร์,พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2538
- [3] โคทม อารียา, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 . ซีเอ็ดยูเคชั่น , พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2540
- [4] พันศักดิ์ พุฒินานิตพงษ์, ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2544
- [5] ณรงค์ กล่อมสุนทร, งานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2542
- [6] ณรงค์ ขอนตะวัน, เครื่องวัดไฟฟ้า. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ , พิมพ์ครั้งที่ 2 : 2538
- [7] วชิระ มั่งวิฑิตกุล , 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] ศิริพรรณ ธงชัย และ พิชัย อัมมมงคล. การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า. : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [11] การจัดการใช้ไฟฟ้า,กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, ,สำนักงาน คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ
- [12] เอกสารการอนุรักษ์พลังงานของญี่ปุ่น