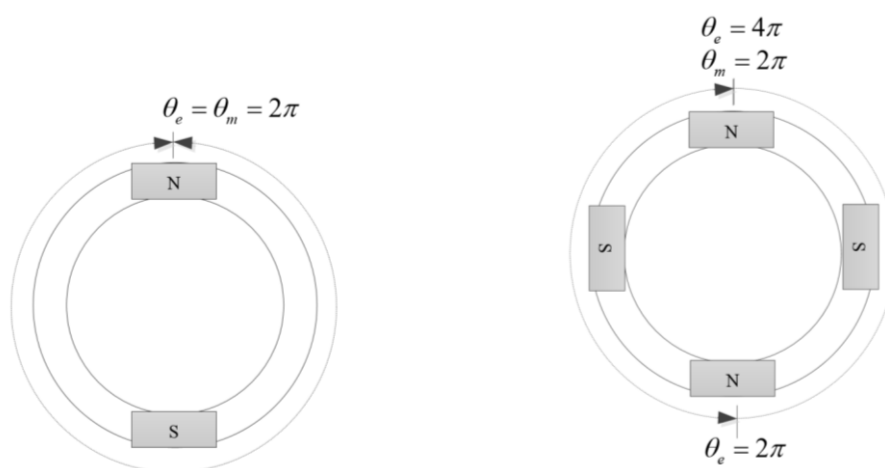


หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า

Fundamental of Electrical Engineering



$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m; f_e = \frac{P}{2} f_m; f_m = \frac{N_s}{60}$$
$$f_e = \frac{P}{2} \cdot \frac{N_s}{60} = \frac{P \cdot N_s}{120}$$

$$N_s = \frac{120 f_e}{P}$$

รศ.ดร.กานต์ เกิดขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

คำนำ

หนังสือนี้จัดทำเพื่อให้ผู้ที่สนใจ หรือผู้ที่ต้องการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบไฟฟ้า เพื่อสามารถใช้ไฟฟ้า หรือปรับปรุงระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย หนังสือนี้ยังสามารถใช้ประกอบการเรียนรายวิชาหลักมูลวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับนักศึกษานอกสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าได้ด้วย อย่างไรก็ตามนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าก็สามารถใช้อ่านเพื่อให้เข้าใจพื้นฐานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นไป คณาจารย์ยังสามารถใช้เตรียมการสอนในรายวิชาดังกล่าวได้ด้วย

นอกจากนี้ผู้เขียนยังเพิ่มประสบการณ์ด้านพลังงานทดแทนสมัยใหม่ ซึ่งเป็นระบบโซลาร์เซลล์เพื่อการลดค่าพลังงานไฟฟ้าในท้ายเล่มไว้ด้วย เพื่อหวังผู้อ่านและศึกษาจะได้ใช้ประโยชน์ดังกล่าวต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น

สิงหาคม 2559

เมษายน 2563

สิงหาคม 2568

สารบัญ

บทที่ 1 วงจรไฟฟ้า	1-1
1.1 กล่าวนำ	1-1
1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	1-1
1.3 ทางเดินไฟฟ้าและส่วนประกอบ	1-2
1.4 โหลดทางไฟฟ้า	1-4
1.5 วงจรไฟฟ้า	1-5
1.6 บทสรุป	1-10
แบบฝึกหัด	1-11
บทที่ 2 ระบบไฟฟ้าสามเฟส	2-1
2.1 กล่าวนำ	2-1
2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส	2-1
2.3 โหลดระบบไฟฟ้าสามเฟส	2-2
2.4 กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส	2-3
2.5 บทสรุป	2-4
แบบฝึกหัด	2-4
บทที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้า	3-1
3.1 กล่าวนำ	3-1
3.2 การทำงานและวงจรสมมูล	3-1
3.3 การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า	3-4
3.3 บทสรุป	3-5
แบบฝึกหัด	3-5
บทที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	4-1
4.1 บทนำ	4-1
4.2 โครงสร้างและการทำงาน	4-1
4.2 การไหลของกำลังไฟฟ้า	4-2
4.3 การขนานเครื่องกำเนิด	4-4

4.4 บทสรุป	4-5
แบบฝึกหัด	4-5
บทที่ 5 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	5-1
5.1 บทนำ	5-1
5.2 โครงสร้างและการทำงาน	5-1
5.3 การไหลของกำลังไฟฟ้า	5-8
5.4 การเริ่มเดินและการควบคุม	5-9
5.5 บทสรุป	5-11
แบบฝึกหัด	5-11
บทที่ 6 การปรับแก้ตัวประกอบกำลัง	
6.1 บทนำ	6-1
6.2 ความสำคัญของตัวประกอบกำลัง	6-1
6.3 การคุมตัวประกอบกำลังอัตโนมัติ	6-3
6.4 บทสรุป	6-4
บทที่ 7 พื้นฐานการออกแบบระบบไฟฟ้า	
7.1 บทนำ	7-1
7.2 การเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันและสายไฟฟ้า	7-1
7.3 บทสรุป	7-8

ภาคผนวก การออกแบบและติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์เพื่อการลดค่าพลังงานไฟฟ้า

บทที่ 1 วงจรไฟฟ้า

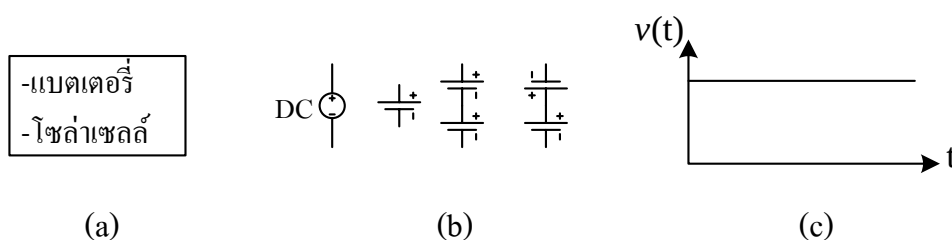
1.1 กล่าวนำ

โดยปกติแล้วคำว่าวงจรไฟฟ้ามักใช้กล่าวถึงทางเดินกระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ไปหาอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าอาจได้แก่ โรงผลิตไฟฟ้า หรือ แบตเตอรี่ เป็นต้น อุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าอาจได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า หม้อหุงข้าว เป็นต้น วัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดสามารถจำลองเป็นรูปแบบสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า และใช้คณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาให้เราสามารถเข้าใจและควบคุมระบบไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการจำลองแหล่งผลิตไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า และทางเดินกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าอย่างไม่ละเอียดมากนัก ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจว่า “วงจรไฟฟ้าง่ายกว่าที่คิด” ต่อจากนั้นเป็นการแก้ปัญหาเมื่อวัสดุอุปกรณ์เหล่านั้นมาต่อเพื่อใช้งานในรูปแบบของวงจรไฟฟ้า

1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Electric Source)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะแหล่งกำเนิดไฟฟ้า สัญลักษณ์ และคุณสมบัติแรงดันแสดงดังรูป



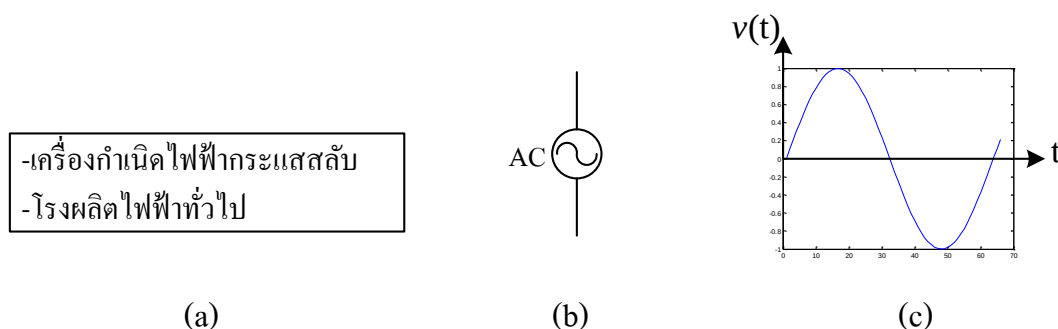
รูปที่ 1.1 (a) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (b) สัญลักษณ์ (c) คุณสมบัติแรงดันและเวลา

จากรูปที่ 1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้จากแหล่งกำเนิดได้หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ โซลาร์เซลล์ หรือวงจรแปลงผันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง เป็นต้น (ในแต่ละแหล่งกำเนิดอาจมีวงจรเทียบเคียงที่ซับซ้อนกว่านี้)

สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอาจใช้เป็นรูปวงกลมแสดงขั้วแรงดันที่ชัดเจน หรือแสดงเป็นเส้นขีดยาวขีดสั้นดังรูปที่ 1.1 (b) และขนาดของแรงดันจะมากหรือน้อยนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันแต่ละแหล่งจ่ายแล้วยังขึ้นอยู่กับค่าการต่อของแหล่งจ่ายด้วย

ส่วนลักษณะสมบัติรูปคลื่นแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ดังในรูปที่ 1.1 (c)

สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้บ้านในอาคารประเทศเรานั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ที่มีความถี่เป็น 50 เฮิร์ตซ์ (Hertz, Hz) หรือรอบต่อวินาที ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้กันในโลกนี้มีอยู่ 2 ความถี่คือ 50 และ 60Hz ในกลุ่มประเทศที่เลือกใช้ 50Hz จะมีขนาดแรงดันเป็น 220 โวลต์ สำหรับกลุ่ม 60Hz จะมีขนาดแรงดันเป็น 110 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ สัญลักษณ์ และรูปคลื่นแรงดันเป็นดังรูปต่อไปนี้

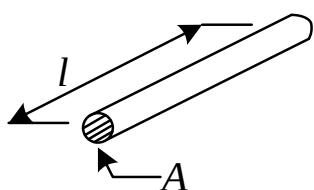


รูปที่ 1.2 (a) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (b) สัญลักษณ์ (c) คุณสมบัติแรงดันและเวลา

จากรูปที่ 1.2 (a) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หรืออาจเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) เป็นเครื่องกำเนิดที่ติดตั้งอยู่ตามโรงไฟฟ้าทั่วไป อาทิเช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ หรือ โรงไฟฟ้าพลังความร้อน เป็นต้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะรับพลังงานกลจากกังหันเข้ามาที่เพลามหุน เมื่อเพลามหุนซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเหนือได้ติดอยู่ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (stator) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิด สามารถนำไปจ่ายโหลดทางไฟฟ้าได้ต่อไป

1.3 ทางเดินไฟฟ้าและส่วนประกอบ

ในระบบไฟฟ้ากำลังทางเดินของกระแสไฟฟ้ามักใช้ตัวนำ หรือสายไฟฟ้าที่ทำจาก อลูมิเนียม หรือทองแดง ถ้าหากเป็นระบบไฟฟ้าในอาคารที่ติดตั้งในอากาศมักจะใช้อลูมิเนียม เพราะมีน้ำหนักเบา แต่ถ้าเป็นระบบไฟฟ้าในอาคารหรือติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดินมักนิยมใช้ ทองแดง เพราะทองแดงทนต่อการบิดงอได้มากกว่า นอกจากนี้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ ทองแดงจะมีค่าน้อยกว่าของอลูมิเนียมด้วย ปกติแล้วสายไฟฟ้าสามารถจำลองได้เป็นตัว ต้านทานไฟฟ้า R (จำลองอย่างง่าย) ได้ดังรูป



(a)

$$R \propto \frac{l}{A}$$

(b)



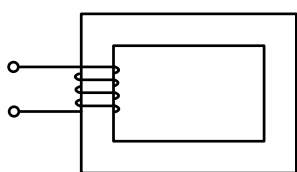
(c)

รูปที่ 1.3 (a) สายไฟฟ้าแบบเปลือย (b) ค่าความต้านทาน

(c) สัญลักษณ์

ค่าความต้านทานจะแปรตามความยาวสายไฟฟ้า l แต่จะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของ สายไฟฟ้า A นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย โดยถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานนี้จะ สูงขึ้นด้วย

สำหรับส่วนประกอบอื่นในระบบไฟฟ้าถ้าหากเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก เราสามารถ จำลองทางไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำ โดยปกติเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำ จะเกิด สนามแม่เหล็กรอบตัวนำ สนามแม่เหล็กที่คล้องตัวนำนี้สามารถจำลองเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)



(a)

$$L \propto \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

(b)



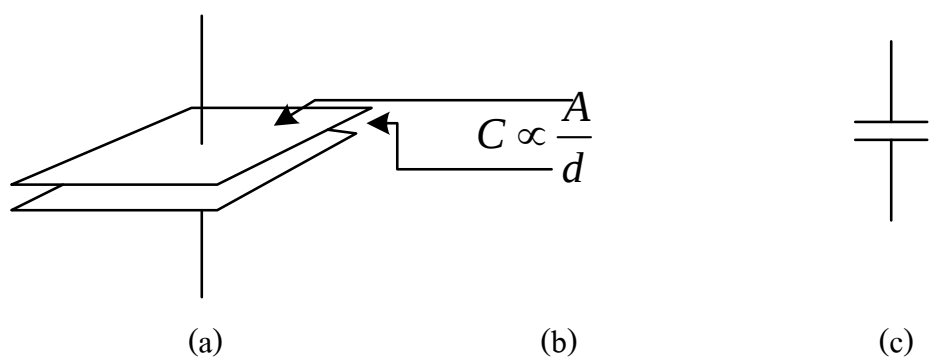
(c)

รูปที่ 1.4 (a) ขดลวดพันบนแกนเหล็ก (b) ค่าความเหนี่ยวนำ

(c) สัญลักษณ์

ค่าความเหนี่ยวนำ L ของขดลวดจะแปรตามจำนวนรอบขดลวด N กำลังสอง และแปรผกผันกับค่าต้านทานสนามแม่เหล็ก $\mathcal{H}$ ถ้าเป็นแกนเหล็กค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กจะต่ำ แต่ถ้าเป็นแกนอากาศค่าความต้านทานแม่เหล็กจะสูง

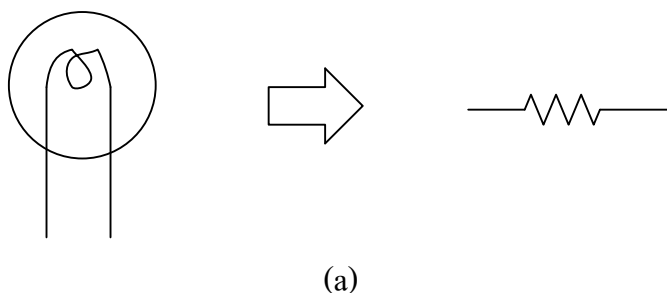
ในระบบที่มีสนามไฟฟ้าสูงๆ สามารถจำลองเป็นตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในระบบไฟฟ้าได้ ตัวเก็บประจุเราสามารถขึ้นได้จากแผ่นเพลทโลหะสองข้างคั่นกลางด้วยฉนวนไฟฟ้า อย่างไรก็ตามวัสดุที่อยู่ในวงจรไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์อยู่ระหว่างอุปกรณ์จะมีตัวเก็บประจุอยู่เสมอ



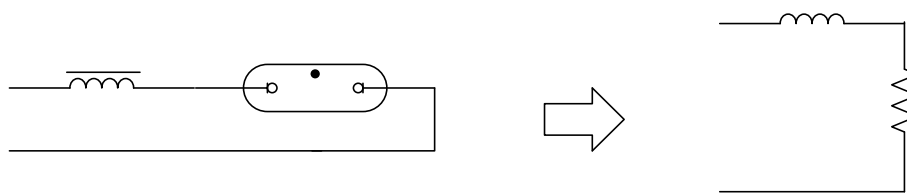
รูปที่ 1.5 (a) ลักษณะตัวเก็บประจุ (b) ค่าความจุ (c) สัญลักษณ์

1.4 โหลดทางไฟฟ้า

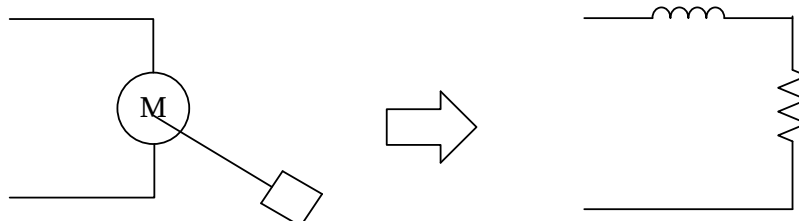
โหลดทางไฟฟ้าในโลกนี้จะเป็นโหลดที่สามารถแสดงพฤติกรรมออกมาเหมือนส่วนประกอบได้ 3 ส่วนโหลด คือ โหลด R โหลด RL หรือ โหลด RC อย่างไรก็ตามโหลดโดยส่วนใหญ่ที่ใช้งานจะเป็นลักษณะโหลด R และ RL โหลดทางไฟฟ้าที่เราพบบ่อยในชีวิตประจำวันเป็นดังรูปต่อไปนี้



(a)



(b)



(c)

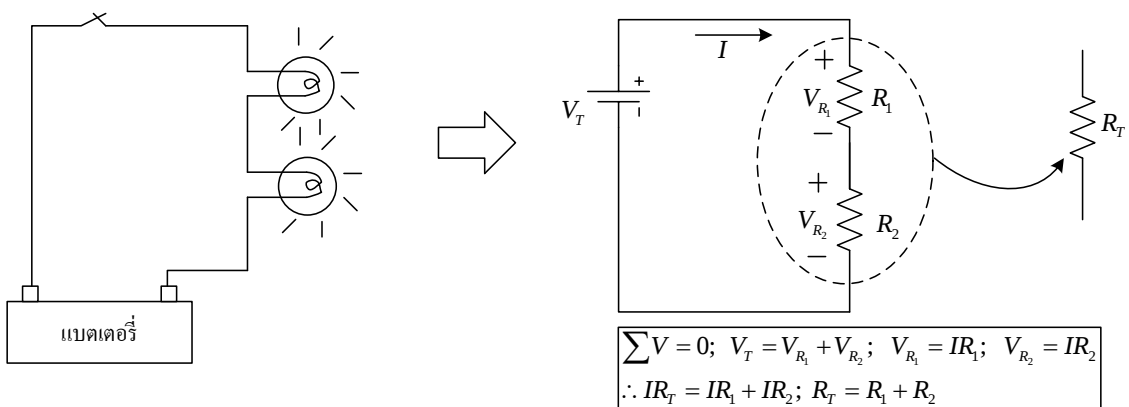
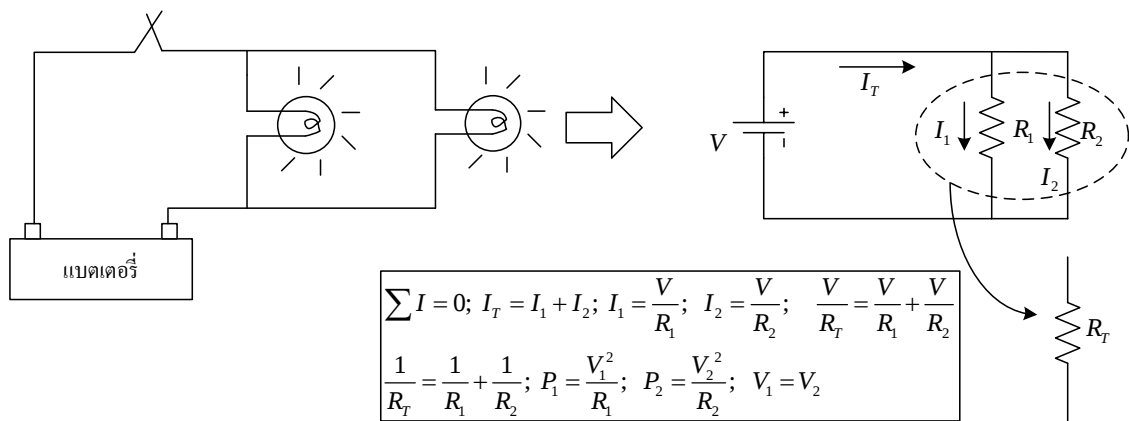
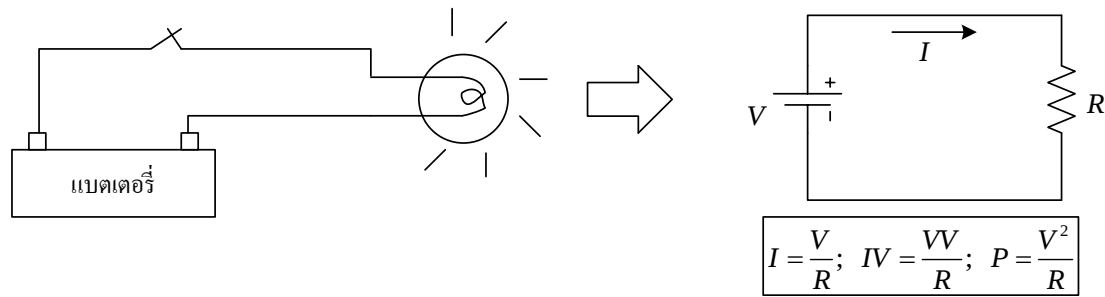
รูปที่ 1.6 โหลดทางไฟฟ้าและสัญลักษณ์ (a) หลอดไฟฟ้าแบบไส้

(b) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (c) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 1.6 หลอดไฟฟ้าแบบไส้สามารถจำลองเป็นตัวต้านทาน นอกจากนี้พวกโหลดประเภทให้ความร้อน เช่น หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ก็จำลองเป็นตัวต้านทานได้เช่นกัน หรือโหลดประเภทอื่นที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) เป็น 1 ก็สามารถจำลองเป็นตัวต้านทานได้ สำหรับโหลดเป็นประเภทที่มีขดลวดเป็นส่วนประกอบ เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือ มอเตอร์ไฟฟ้า ก็สามารถจำลองเป็นส่วนประกอบร่วมระหว่างตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำได้ดังรูป 1.6 (b) และ (c) ซึ่งโหลดเหล่านี้จะมีตัวประกอบกำลังเป็นค่าหลัง (lagging) กล่าวคือเฟสของกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังเฟสแรงดันเสมอ (ค่อยขยายความอีกครั้ง)

1.5 วงจรไฟฟ้า

วงจรไฟฟ้าเป็นการเชื่อมโยงกันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดทางไฟฟ้า ซึ่งโหลดทางไฟฟ้านี้จะก่อให้เกิดประโยชน์จากการใช้ไฟฟ้า เมื่อมีการเชื่อมโยงทางไฟฟ้าแล้ว เราต้องมีการควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากการใช้ไฟฟ้า ตลอดจนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นเราต้องมีการคำนวณและวิเคราะห์ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อการควบคุมและป้องกันทางไฟฟ้าดังกล่าว ลักษณะของวงจรไฟฟ้าที่ครบองค์ประกอบเป็นดังรูปต่อไปนี้



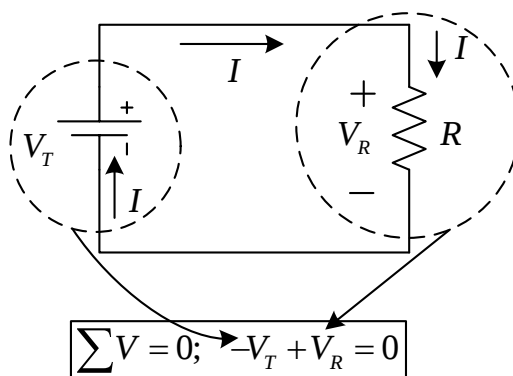
รูปที่ 1.7 อุปกรณ์ไฟฟ้า วงจรไฟฟ้า และสมการที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 1.7 (a) เป็นรูปวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย เมื่อปิดวงจร (เปิดไฟ) กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแบตเตอรี่ไปหาหลอดไฟ และกลับมากับวงจรที่ขั้วลบของแบตเตอรี่ วงจรไฟฟ้าจะต้องครบวงจรอย่างนี้เสมอ จึงจะถือว่าวงจรไฟฟ้านี้ครบวงจร ในวงจรนี้สามารถคำนวณหาค่าที่เกี่ยวข้องโดยใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ซึ่งกฎของโอห์มนี้อีกเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการทำ ความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า

ในรูปที่ 1.7 (b) หลอดไฟฟ้าที่ต่อขนานกันนั้นเป็นลักษณะการต่อโหลดทางไฟฟ้าที่ต่อใช้งานกันเป็นปกติทั่วไป การพิจารณาเกี่ยวกับวงจรนี้อาจพิจารณาได้ว่า ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่โหนดใดๆ มีค่าเป็นศูนย์ตามกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Current Law, KCL) กล่าวคือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านความต้านทานที่ 1 และ 2 จะเท่ากับกระแสไฟฟ้ารวมที่มาจากแหล่งจ่ายนั่นเอง ส่วนความสัมพันธ์อื่นที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณต่างๆ ก็เป็นตามหลักคณิตศาสตร์

ในรูปที่ 1.7 (c) นั้นเป็นหลอดไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกัน ซึ่งถ้าหากหลอดใดหลอดหนึ่งขาดเสียหาย จะส่งผลให้หลอดไฟฟ้าทั้งวงจรไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นจึงไม่นิยมต่อใช้งานจริง การพิจารณาเกี่ยวกับวงจรนี้อาจใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) มาอธิบายได้ กล่าวคือ ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในวงรอบใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ในท้ายสุดของรูปภาพจะได้ว่าความต้านทานที่อนุกรมกันนั้นมีค่าเป็นผลรวมของความต้านทานที่อนุกรมกันนั่นเอง

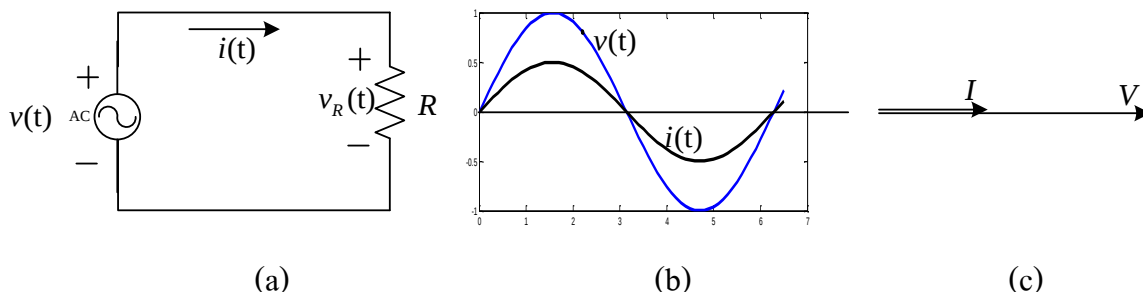
การพิจารณาเรื่องแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และโหลดทางไฟฟ้า เราต้องพิจารณาตามทิศของกระแสไฟฟ้าว่าเข้าออกขั้วด้านใดของแรงดันแหล่งจ่าย หรือโหลด แล้วจึงกำหนดขั้วแรงดันไฟฟ้าสำหรับการพิจารณาต่อไปดังรูป



รูปที่ 1.8 เทคนิคการพิจารณาขั้วแรงดันไฟฟ้า

ในกรณีที่วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Inductor, L) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำหาได้จากกฎของฟาราเดย์เป็นเบื้องต้น จึงได้เป็น $V_L = L \frac{di}{dt}$ (หรือพิจารณาเป็นแรงดันที่เหนี่ยวนำได้มีขั้วและขนาดเป็น $V_L = -L \frac{di}{dt}$) ถ้าหากเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่กระแสไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว แรงดันเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าหากเป็นแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้า

กระแสสลับ ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ต่อไปนี้จะเป็นการพิจารณาเมื่อแหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

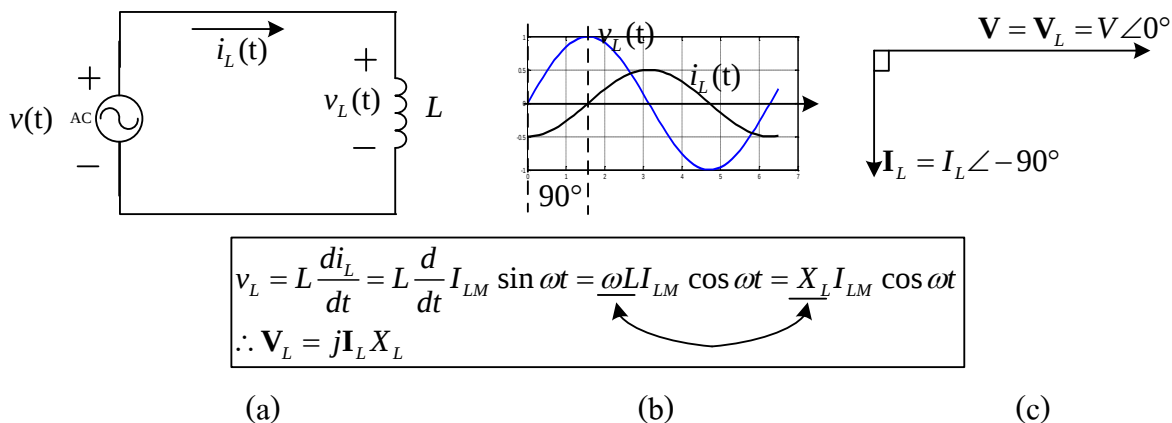


รูปที่ 1.9 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกับโหลดตัวต้านทาน (a) วงจร (b) ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแส (c) เฟสเซอร์

เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้กับโหลดตัวต้านทาน R ดังรูปที่ 1.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R จะมีรูปคลื่นที่ทับเฟสเดียวกันกับแหล่งจ่ายดังรูปที่ 1.9 (b) ดังนั้นเมื่อเราแสดงปริมาณและขนาดเป็นลักษณะเฟสเซอร์ เราเขียนได้ดังรูปที่ 1.9 (c)

ในรูป 1.9 (a) และ (b) เราจะสังเกตว่าผู้เขียนแสดงปริมาณกระแสและแรงดันเป็นตัวเล็กในฟังก์ชันของเวลา นั่นหมายถึงปริมาณที่เป็นค่าชั่วขณะ ส่วนในรูปที่ 1.9 (c) เป็นตัวอักษรใหญ่ ซึ่งตัวอักษรใหญ่นี้เป็นตัวแสดงเป็นค่าประสิทธิผล หรือปริมาณค่า rms (root mean square) ของไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปริมาณกระแสสลับนี้ถ้าพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยแล้วจะมีค่าเป็น “0” แต่ค่า rms ของกระแสและแรงดันไฟสลับนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่โหลด R มีค่าเท่ากับที่ป้อนไฟฟ้ากระแสตรง ยกตัวอย่างเช่นไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเราที่บอกว่าแรงดันเป็น 220 โวลต์นี้ก็คือค่าแรงดันที่เป็น rms นั่นเอง

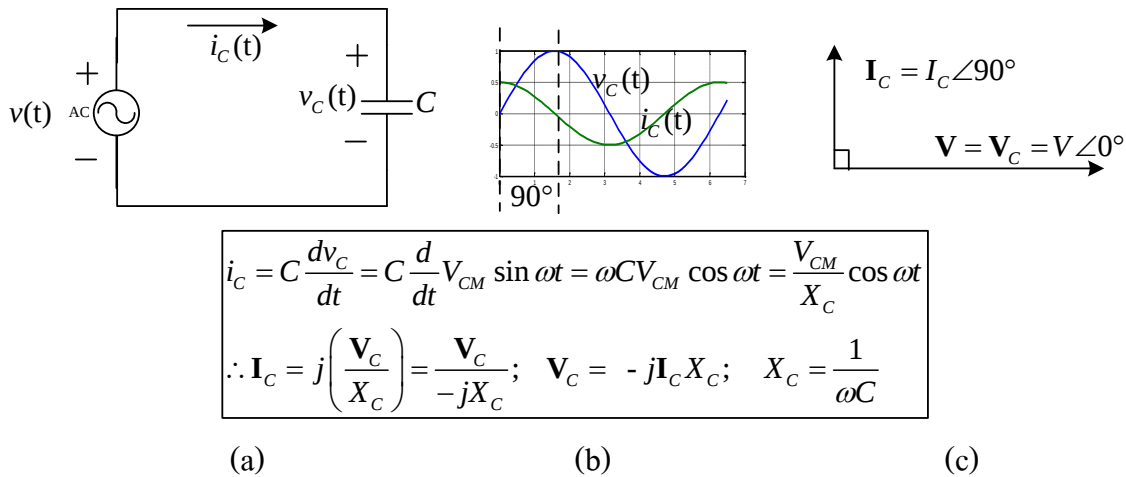
ถ้าหากเรานำไฟฟ้ากระแสสลับไปป้อนให้กับตัวเหนี่ยวนำ L แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำหาได้จากกฎของฟาราเดย์ได้เป็น $V_L = L \frac{di}{dt}$ ซึ่งส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อม L ที่สภาวะคงตัวแล้วมีเฟสหน้าหน้ากระแสไฟฟ้าที่ผ่าน L อยู่ 90 องศา ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1.10 ไฟฟ้ากระแสสลับกับตัวเหนี่ยวนำพร้อมสมการที่เกี่ยวข้อง (a) วงจร (b) รูปคลื่น (c) เฟสเซอร์

ลักษณะกระแสไฟฟ้าที่ล่าช้า (lagging) แรงดันไฟฟ้าอยู่ 90 องศาเพราะเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์ที่เข้ามาที่ขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งท้ายสุดแล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มันเอง ดังนั้นที่สภาวะคงตัวแล้วกระแสไฟฟ้าจะล่าช้าแรงดันไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเราสามารถจำลองแรงดันไฟฟ้านี้ได้เป็น $j \mathbf{I}_L X_L$ ซึ่งตัว j นี้เองที่เป็นตัวบอกว่าแรงดันนำหน้ากระแส

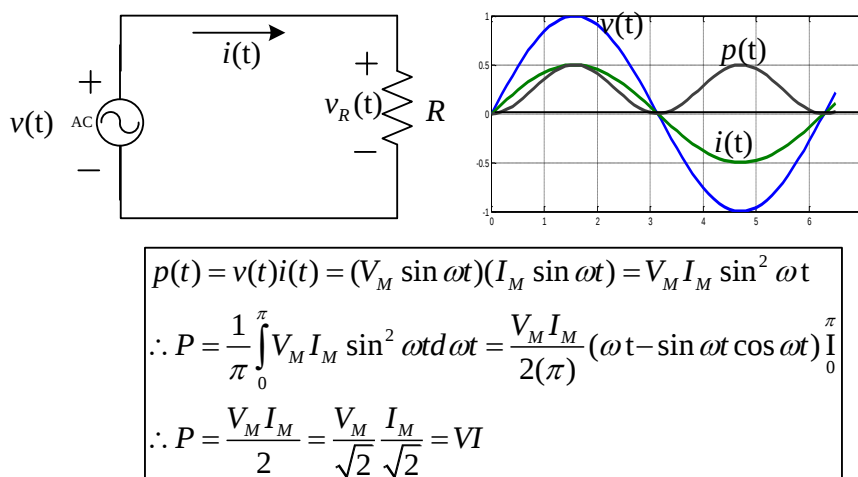
กรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับต่ออยู่กับตัวเก็บประจุนั้น กระแสไฟฟ้าที่เข้าตัวเก็บประจุหาได้จากค่าความจุคูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา การต่อวงจรและความสัมพันธ์ต่างๆ เป็นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1.11 ไฟฟ้ากระแสสลับกับตัวเก็บประจุพร้อมสมการที่เกี่ยวข้อง (a) วงจร (b) รูปคลื่น (c) เฟสเซอร์

รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่เข้าไปที่ตัวเก็บประจุจะนำหน้า (leading) แรงดันไฟฟ้าอยู่ 90 องศา ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ตรงกันข้ามกับตัวเหนี่ยวนำ

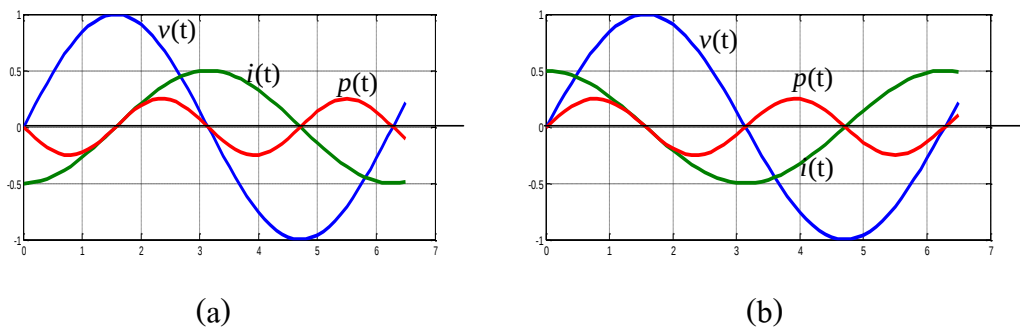
ถ้าพิจารณากำลังไฟฟ้า เราสามารถนำค่าชั่วขณะของแรงดันและกระแสมาคูณกัน ต่อจากนั้นจึงนำผลคูณนั้นมาหาค่าเฉลี่ย กรณีเป็นโหลดความต้านทานไฟฟ้าจะมีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเกิดขึ้นที่โหลดตามสมการและรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.12 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในโหลดตัวต้านทาน

เมื่อโหลดเป็น R อย่างเดียวค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P) ได้หาได้ค่าเฉลี่ยของผลรวมของแรงดันคูณกับกระแสไฟฟ้าหรือค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะนั่นเอง ซึ่งในท้ายสุดค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับโหลด R นี้หาได้แรงดันประสิทธิผล (rms) V คูณกับกระแสไฟฟ้า rms I นั่นเอง

ถ้าหากโหลดเป็น L หรือ C อย่างเดียวแล้วมีการพิจารณาหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามในรูปที่ 1.12 แล้ว ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจะมีค่าเป็น “0” ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1.13 กำลังไฟฟ้าเมื่อโหลดเป็น (a) L หรือ (b) C

โดยปกติแล้วโหลดทางไฟฟ้ามักเป็นการผสมระหว่างโหลด R กับ L หรือ C ดังนั้นมุมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าจะไม่ใช่ 0 หรือ 90 องศา แต่จะเป็นมุม θ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 อาจเป็นทั้งบวก หรือ ลบ ก็ได้ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ $p(t)$ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P อาจหาได้สมการต่อไปนี้

$$p(t) = v(t)i(t) = (V_M \cos \omega t)(I_M \cos(\omega t - \theta)) = \frac{V_M I_M}{2} (\cos \theta + \cos(2\omega t - \theta))$$

$$p(t) = \frac{V_M I_M}{2} (\cos \theta + \cos(2\omega t) \cos \theta + \sin(2\omega t) \sin \theta)$$

$$p(t) = \frac{V_M I_M}{2} (\cos \theta (1 + \cos(2\omega t)) + \sin(2\omega t) \sin \theta)$$

$$p(t) = VI (\cos \theta (1 + \cos(2\omega t)) + \sin(2\omega t) \sin \theta)$$

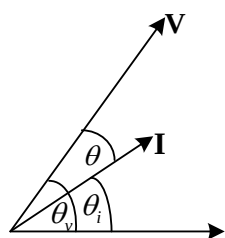
ถ้าเรากำหนดให้ $P = VI \cos \theta$ และ $Q = VI \sin \theta$ เราจะได้กำลังไฟฟ้าชั่วขณะมีค่าเป็น

$$p(t) = P(1 + \cos(2\omega t)) + Q \sin(2\omega t)$$

ซึ่งตัว P นี้เราเรียกว่ากำลังไฟฟ้าจริง (real power) หรือ (active power) และ Q เราเรียกว่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power) ส่วนตัว $\cos \theta$ เราจะเรียกว่าตัวประกอบกำลัง

ตัวกำลังไฟฟ้าจริงนี้เองเป็นตัวที่ทำให้เกิดงานจริง อาทิเช่น สามารถแปรสภาพเป็นพลังงานกล พลังงานความร้อน หรือพลังแสงสว่าง เป็นต้น กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้สามารถแสดงเป็นในรูปกำลังเชิงซ้อน

ถ้าเราให้ S เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (apparent power) ที่เป็นผลคูณระหว่างขนาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้ว เราจะได้กำลังไฟฟ้าปรากฏในรูปกำลังเชิงซ้อนเป็น



$$\begin{aligned} S &= \mathbf{VI}^* = V \angle \theta_v I \angle -\theta_i = VI \angle (\theta_v - \theta_i) = VI \angle \theta \\ S &= VI \cos \theta + jVI \sin \theta = P + jQ \end{aligned}$$

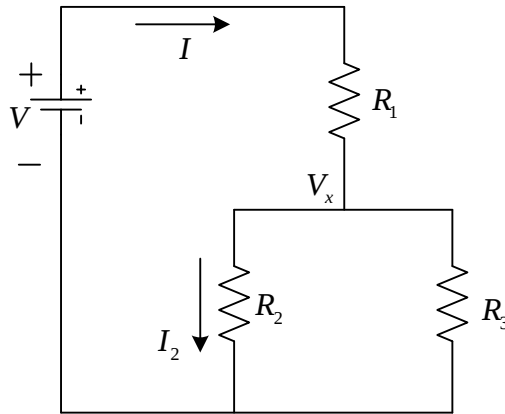
รูปที่ 1.14 กำลังเชิงซ้อน

1.6 บทสรุป

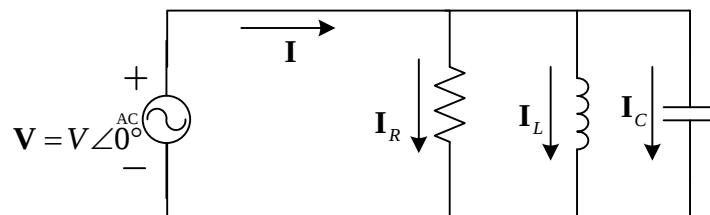
วงจรไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการที่เราจะควบคุม หรือปฏิบัติการใดๆ เกี่ยวกับระบบไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าทำให้เราเขียนจำลองเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ซึ่งเมื่อเป็นวงจรไฟฟ้าแล้วเราสามารถที่จะวิเคราะห์ผลกระทบของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ที่เชื่อมโยงกันได้ วงจรไฟฟ้ายังเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างมาก

แบบฝึกหัด

ข้อ 1 จงแสดงวิธีการเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้า I_2

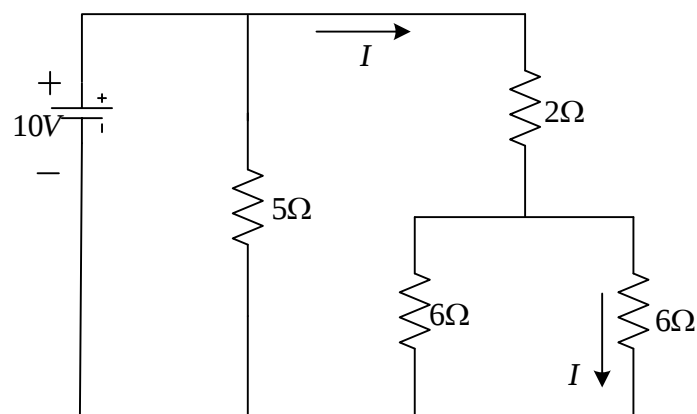


ข้อ 2 จงแสดงเฟสเซอร์ของ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ทุกส่วนของวงจร

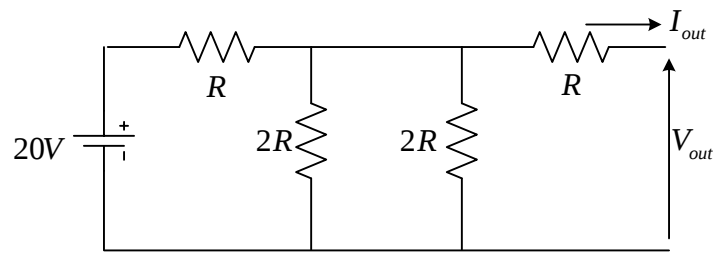


ข้อ 3 จากข้อ 2 จงอธิบายความสัมพันธ์ของวงจรกับการใช้โหลดทางไฟฟ้า โดยกำหนด RL คือ โหลดในเบื้องต้น ต่อจากนั้น C เป็นอุปกรณ์ที่นำมาต่อในภายหลัง

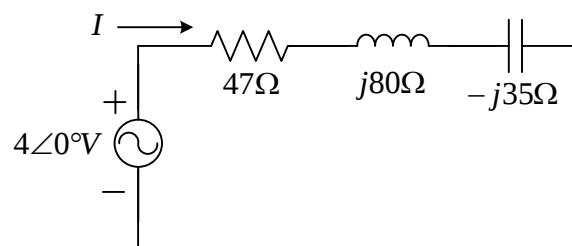
ข้อ 4 จงหาค่ากระแสไฟฟ้า I มีค่ากี่แอมป์แปร์ [1A]



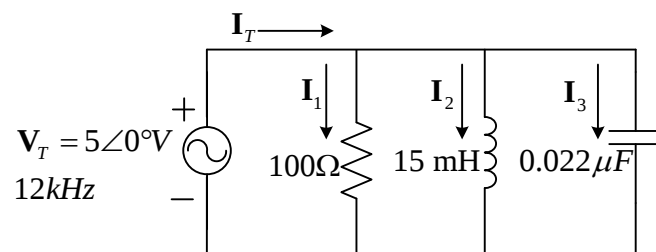
ข้อ 5 จากรูป V_{out} และ I_{out} มีค่าเท่าใด [10V; 0A]



ข้อ 6 จงหาค่ากระแสไฟฟ้า I พร้อมแสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน และกระแส ทุกส่วน



ข้อ 7 จงหาค่ากระแสไฟฟ้าในรูปทุกตัว พร้อมแสดงเฟสเซอร์ที่เกี่ยวข้อง พร้อมหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ และกำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหลดรวมทั้ง 3 ตัว



บทที่ 2

ระบบไฟฟ้าสามเฟส

2.1 กล่าวนำ

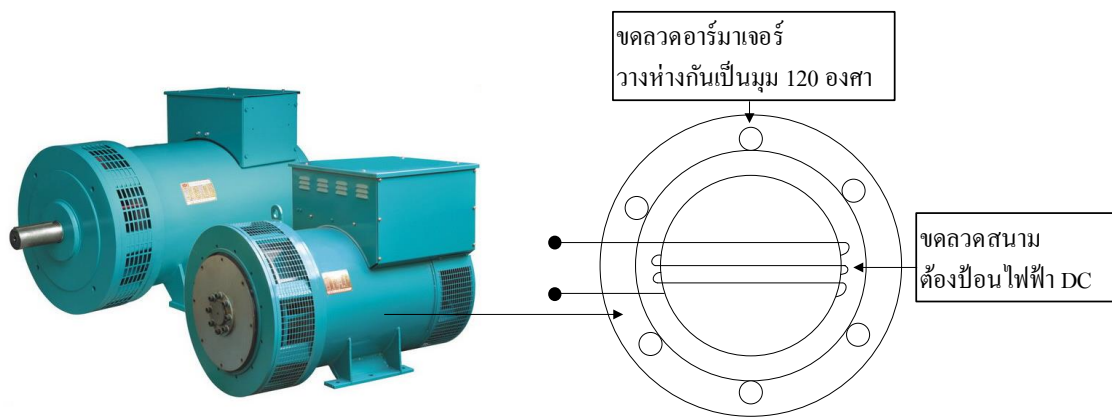
ระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้มาจากโรงผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั้งหลาย การใช้ไฟฟ้าสามเฟสทั้งในระบบการผลิตไฟฟ้า และการใช้ไฟฟ้ามีข้อดี คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสและในแต่ละสายมีความสมดุล สนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความสมมาตรในการหมุน และถ้าหากการใช้ไฟฟ้ามีความสมดุลในแต่ละเฟสแล้ว จะส่งผลให้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะส่งผลดีต่อแรงดันตกและความสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีค่าลดลง ดังนั้นในอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้าขนาดใหญ่แล้วจะนิยมใช้ระบบไฟฟ้าสามเฟสทั้งสิ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงการผลิตไฟฟ้าสามเฟส โหลดทางไฟฟ้าของระบบสามเฟส การคำนวณที่เกี่ยวข้องทั้งแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส

2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส

ต้นกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสในระบบส่งกำลังไฟฟ้านั้นมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสนี้มีขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) เป็นขดลวดสามชุด แต่ละชุดวางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ขดลวดนี้ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับโหลดทางไฟฟ้าต่อไป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสมีส่วนประกอบทั่วไปอยู่ 2 ส่วน คือ ขดลวดสนาม (Field winding) และขดลวดอาร์มาเจอร์ ขดลวดสนามโดยส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ที่โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่หมุน ขดลวดสนามนี้จะรับไฟฟ้ากระแสตรงที่กำลังไม่มากเพื่อการสร้างสนามแม่เหล็กหลักในเครื่องกำเนิด เมื่อขดลวดสนามมีการหมุนโดยการขับเคลื่อนของเครื่องต้นกำลัง สนามแม่เหล็กจะตัดและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้สามารถนำไปจ่ายโหลดทางไฟฟ้าได้ เมื่อเราจ่ายโหลดแล้วเราสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage) ได้ ลักษณะภาพวาดโครงสร้าง และส่วนประกอบวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) เป็นดังรูปที่ 2.1

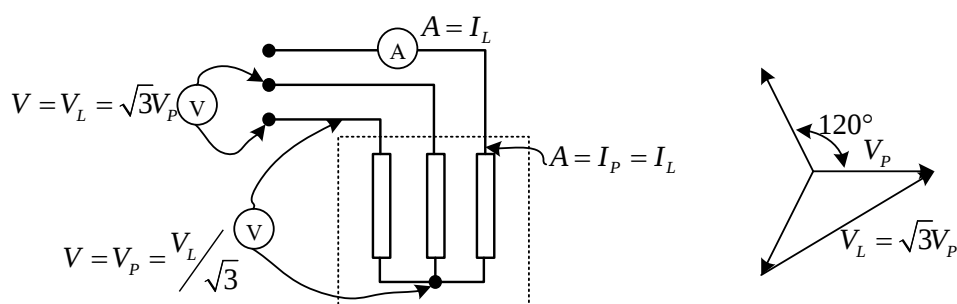


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้าง และภาพตัดแสดงส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

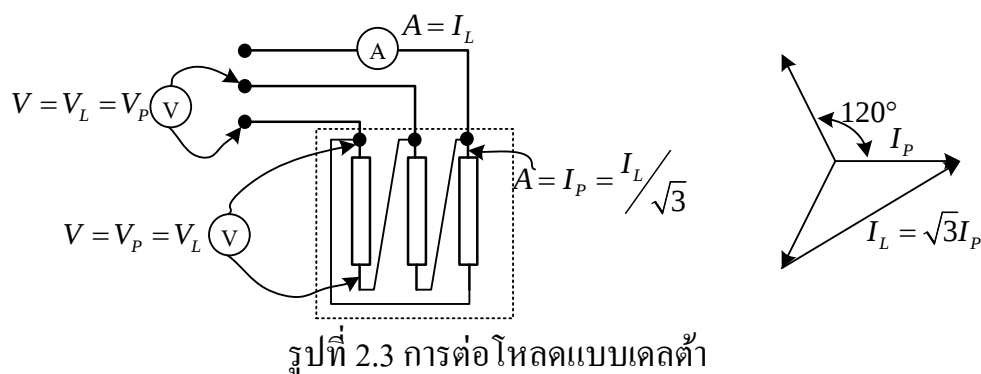
จากรูปที่ 2.1 ขดลวดสนามอาจถูกออกแบบให้เป็นแม่เหล็กถาวรก็ได้ ส่วนโครงสร้างที่เป็นที่อยู่ของขดลวดอาร์มาเจอร์จะเป็นแกนเหล็กแผ่นบางที่เป็นทางเดินสนามแม่เหล็ก เหล็กแผ่นบางจะวางซ้อนกันมีฉนวนบางระหว่างแผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กบางนี้เป็นวัสดุแม่เหล็กหรือเฟอร์โรแมกเนติกส์ ซึ่งถ้าสามารถสร้างแกนเหล็กที่มีความซึมซาบสนามแม่เหล็กได้มาก ซึ่งนักวัสดุวิศวกรรมที่สนใจวัสดุแม่เหล็กก็สามารถพัฒนาตรงจุดนี้ได้ จะทำให้เครื่องกลไฟฟ้ามีขนาดเล็กลง และความสูญเสียในแกนเหล็กลดลงด้วย

2.3 โหลดระบบไฟฟ้าสามเฟส

โหลดของระบบไฟฟ้าสามเฟสปกติแล้วจะเป็นโหลดสามเฟสสมดุล คำว่าสมดุลนี้หมายถึงในแต่ละเฟสจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากัน โดยโหลดในแต่ละเฟสนี้อาจจะต่อเป็นแบบดาวหรือแบบเดลต้าก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแรงดันไฟฟ้า ลักษณะสมบัติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของการต่อแต่ละแบบเป็นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การต่อโหลดแบบดาวและเฟสเซอร์แรงดันของโหลดแบบดาว



การต่อโหลดในแต่ละแบบนี้ถ้าหากเป็นโหลดประเภทมอเตอร์ ขดลวดแต่ละเฟสจะวางห่างกันเป็นมุม 120 องศาไฟฟ้า แต่ถ้าเป็นโหลดชนิดอื่นที่แยกเป็นเฟสๆ เมื่อนำมาต่อไม่จำเป็นต้องวางให้ทำมุมเป็น 120 องศา เพียงแต่หากเป็นการต่อแบบวาย เราสามารถจับโหลดด้านใดด้านหนึ่งมาต่อรวมกันได้เลย ถ้าหากเป็นการต่อแบบเคลต้า ก็จะเป็นการต่อแบบหางต่อหัวหางต่อหัวไปเรื่อยๆนั่นเอง

2.4 กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส

กำลังไฟฟ้าของระบบสามเฟสได้จากกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ซึ่งถ้าหากเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลแล้ว กำลังไฟฟ้าสามเฟสสามารถหาได้สมการต่อไปนี้

$$S_{3P} = 3V_P I_P = \sqrt{3}V_L I_L \quad (2.1)$$

หรืออาจเขียนเป็นค่าต่อเฟสได้เป็น

$$S = \mathbf{V}_P \mathbf{I}_P^* = P + jQ = V_P I_P \cos \theta + jV_P I_P \sin \theta \quad (2.2)$$

$$P = V_P I_P \cos \theta \quad (2.3)$$

$$Q = V_P I_P \sin \theta \quad (2.4)$$

ในส่วนกำลังไฟฟ้าจริง P เป็นกำลังไฟฟ้าที่ทำให้เกิดงานจริง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงนี้ถ้าหากเรามีการใช้กำลังไฟฟ้าจริง 1 kW เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นั่นคือการใช้ไฟฟ้า 1 หน่วย ซึ่งในประเทศไทยค่าไฟฟ้าประมาณ 4 บาทต่อหน่วย (ในปี 2562)

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่ได้เกิดประโยชน์ต่อการใช้งานจริง ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้จะมีค่ามากในโหลดทางไฟฟ้าที่เป็นพวกมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นในระบบไฟฟ้าที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ควรต้องนำตัวเก็บประจุเพื่อให้พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่ตรงข้ามกับโหลดมอเตอร์ ถ้าไม่เช่นนั้นเราจะต้องเสียค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับการไฟฟ้า

การต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบไฟฟ้านี้เราเรียกว่า “วิธีการปรับแก้ตัวประกอบกำลัง” โดยประกอบกำลังที่มีค่าต่ำกว่า 0.85 ถ้าหลังของผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ จะต้องมีการคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แล้วการไฟฟ้าจะเก็บค่ากำลังรีแอกทีฟในส่วนที่เกินกิโลวาร์ (kVar) ละประมาณ 172 บาท (ณ ปี 2562)

2.5 บทสรุป

ระบบไฟฟ้าสามเฟสจะใช้กันมากในโหลดทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ การใช้งานระบบไฟฟ้าต้องพยายามให้โหลดสมดุล เพื่อจะทำให้กระแสไหลในสายนิวตรอลเป็นศูนย์ ทำให้คุณภาพแรงดันที่ปลายสายดีขึ้น เพราะแรงดันตกในสายไฟฟ้าจะลดลงด้วย การใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะได้เต็มความสามารถของหม้อแปลง

การปรับแก้ตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสนิยมใช้ชุดควบคุมอัตโนมัติ ถ้าหากการใช้โหลดในระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เครื่องควบคุมอัตโนมัติจะพยายามควบคุมให้ตัวประกอบกำลังค่อนข้างคงที่ ส่งผลให้เราประหยัดค่าไฟฟ้าลงได้

แบบฝึกหัด

ข้อ 1 จงอธิบายความสัมพันธ์ของการปรับแก้ตัวประกอบกำลังว่าสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้อย่างไร

ข้อ 2 เพราะเหตุเราจึงต้องทำการใช้โหลดให้สมดุล

บทที่ 3

หม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 กล่าวนำ

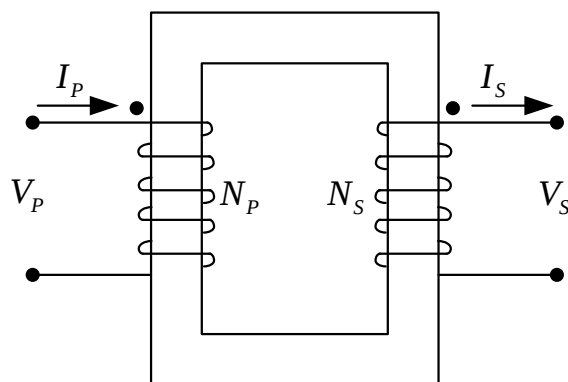
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ การส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อไปใช้งานไกลๆจะต้องมีการยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูง เพราะระดับแรงดันที่สูงนั้นกระแสไฟฟ้าจะลดลง แรงดันที่ลดลงทำให้ความสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าและแรงดันตกในสายไฟฟ้าลดลงด้วย จึงทำให้เราสามารถส่งไฟฟ้าไปใช้ในที่ไกลๆได้

การที่เราจะนำไฟฟ้ามาใช้ในที่อยู่อาศัยเราจะต้องลดระดับแรงดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ไฟฟ้า อย่างเช่นในบ้านเราขนาดแรงดันมาตรฐานที่ใช้กัน คือ 220 โวลต์ เป็นต้น ซึ่งการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมานี้ก็ต้องอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าเช่นกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง เริ่มที่หลักการทำงาน โครงสร้าง ส่วนประกอบ และการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

3.2 การทำงานและวงจรสมมูล

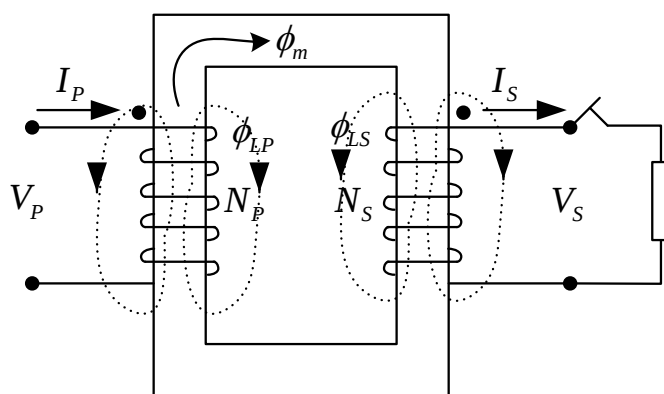
หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานได้มีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ แกนเหล็ก และขดลวด โดยแกนเหล็กที่กล่าวถึงนี้จะใช้เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก ส่วนขดลวดนั้นจะมีอยู่สองชุด เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) และขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

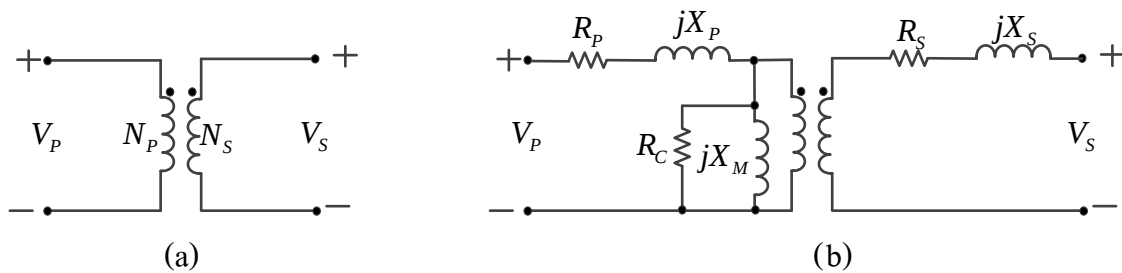
- เมื่อเราป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าขดลวดด้านปฐมภูมิ จะมีกระแสไฟฟ้าเข้าไปสร้างสนามแม่เหล็กหลัก ϕ_m ไหลในแกนเหล็ก มีทิศทางตามกฎมือขวากำ โดยนิ้วทั้งสี่จะเป็นทิศทางกระแสในขดลวด และหัวแม่มือที่กางออกนั้นเป็นทิศทางของสนามแม่เหล็ก
- สนามแม่เหล็กในแกนจะเหนี่ยวนำขดลวดให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทั้งสองขดตามสมการ $e = N \frac{d\phi}{dt}$
- ขั้วของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะอยู่ในทิศทางต้านกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กหลัก ทำให้ในสภาพอุดมคติจะไม่มีกระแสสร้างสนามแม่เหล็กหลัก
- ที่ด้านทุติยภูมินั้นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะปรากฏออกมาที่ขั้ว ซึ่งในกรณีที่ไม่มีโหลดทางไฟฟ้าแรงดันที่ขั้ว V_s นี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในนั่นเอง
- เมื่อนำโหลดทางไฟฟ้ามาต่อที่ด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว จะจ่ายกระแสไฟฟ้า I_s ออกไปที่โหลด โดยกระแสไฟฟ้านี้จะอยู่ในทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหลัก ในขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ I_p จะมีขนาดมากขึ้นตามปริมาณกระแสทุติยภูมิ แต่กระแสปฐมภูมินี้จะสร้างสนามแม่เหล็กในแกนในทิศทางที่เสริมกับสนามแม่เหล็กหลัก ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าทั้งสองขดลวดจึงหักล้างกัน ทำให้สนามแม่เหล็กแม่เหล็กหลักในแกนเหล็กมีค่าคงที่ (อุดมคติ) เราอธิบายด้วยภาพประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะใช้งาน

- ในสภาพจริงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้านนั้นจะมีสนามแม่เหล็กรั่วออกนอกแกนเหล็กผ่านแกนอากาศ $\phi_{LP}; \phi_{LS}$ โดยสนามแม่เหล็กรั่วนี้สามารถจำลองเป็นค่าความเหนี่ยวนำได้

จากการทำงานที่อธิบายไปแล้ว เราสามารถเขียนคำอธิบายนั้นเป็นรูปวงจรสมมูลของหม้อแปลงอุดมคติ และหม้อแปลงสภาพจริงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 (a) วงจรสมมูลหม้อแปลงอุดมคติ (b) วงจรสมมูลหม้อแปลงสภาพจริง

จากรูปที่ 3.2 (a) N_P เป็นจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ N_S เป็นจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ ส่วน V_P เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้หม้อแปลงทางขดปฐมภูมิ และ เป็นแรงดันที่ขั้วที่ปรากฏออกมาจากการเหนี่ยวนำ

ส่วนในรูปที่ 3.2 (b) R_P เป็นความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิ R_S เป็นความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ส่วนค่า X_P และ X_S เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่จำลองจากสนามแม่เหล็กรั่วออกนอกแกนทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ สำหรับ R_C เป็นความต้านทานที่จำลองแทนความสูญเสียในแกนเหล็ก และ X_M เป็นส่วนการจำลองแทนสนามแม่เหล็กรวมทั้งสองขดลวด

จากวงจรสมมูลสรุปได้ว่าเกี่ยวกับการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวงจรไฟฟ้านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าจะความสูญเสียออกมาในรูปความร้อนที่ตัวต้านทาน ส่วนค่ารีแอคแตนซ์อนุกรมจะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงเป็นอย่างมาก ค่าความต้านทานอนุกรมก็เช่นกัน จะมีผลต่อแรงดันตกคร่อมในหม้อแปลงร่วมด้วย

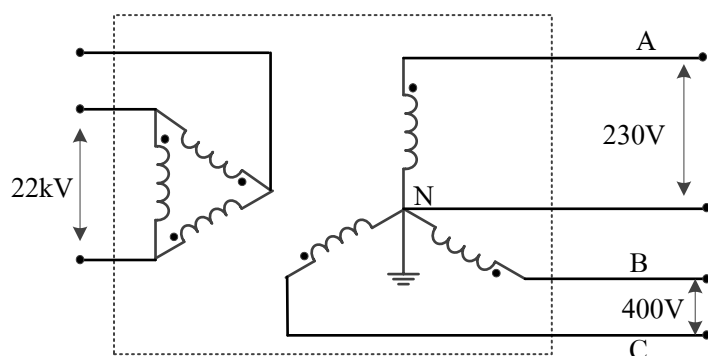
สิ่งที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาเรื่องความสูญเสียพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้าคือค่า R_C เราจะเห็นว่า R_C นี้ต่อขนานกับวงจรไฟฟ้าตลอดเวลา ดังนั้นหม้อแปลงเราจะมีค่าความสูญเสีย

ตลอดเวลาที่มีการต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ถ้าเราสามารถจัดหาหม้อแปลงที่ค่า R_c มีค่าน้อยๆ ก็จะเกิดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในส่วนของหม้อแปลงนี้ได้ ในทางปฏิบัติเราเรียกหม้อแปลงชนิดนี้ว่า “หม้อแปลงแบบโลส” หม้อแปลงแบบความสูญเสียต่ำ หรือ โลสในปัจจุบันนี้ จะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำกว่า 50% ของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติของหม้อแปลงปกติที่มีมาตรฐาน มอก.

3.3 การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง จะเรียกว่า “หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง” หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนี้จะมีทั้งการยกระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นและลง เพื่อให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการใช้งาน

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใกล้ตัวผู้ใช้ไฟฟ้ามามากที่สุดจะเรียกว่า “หม้อแปลงจำหน่าย” หม้อแปลงจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นจะทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 22 กิโลโวลต์ เป็น 400 โวลต์ ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยมาตรฐานการต่อหม้อแปลงจะเป็นเดลต้าวาย ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 การต่อหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

จากรูปที่ 3.3 หม้อแปลงด้านปฐมภูมิต่อแบบเดลต้า ในขณะที่ด้านทุติยภูมิต่อแบบวาย ที่ด้านทุติยภูมิจะมีการต่อสายนิวตรอล (N) ลงดิน เพื่อป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าให้ไหลลงดินไปหม้อแปลงไฟฟ้าจะได้ไม่เสียหาย

นอกจากนี้ที่แต่ละเฟสจะมีการต่อกับดักฟ้าผ่าร่วมด้วย เพื่อทำให้แรงดันเกินที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่าให้ไหลลงดินผ่านสาย N ที่ต่อลงดินอยู่แล้ว

3.4 บทสรุป

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบไฟฟ้ากำลัง ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงเหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นแบบจุ่มในน้ำมัน เพื่อการระบายความร้อนที่ดี ดังนั้นการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีการบำรุงรักษาอย่างดี โดยน้ำมันหม้อแปลงจะต้องเป็นฉนวนอย่างดี การปนเปื้อนของความชื้นทำให้หม้อแปลงชำรุดลัดวงจรได้

แบบฝึกหัด

- ข้อ 1. จงบอกส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานจริง
- ข้อ 2. เพราะเหตุใดหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องมีการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า
- ข้อ 3 การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเราต้องบำรุงรักษาอะไรบ้าง

บทที่ 4

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.1 บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นถ้าหากพูดถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เรานึกถึง “เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ” หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส ในประเทศไทยจะมีการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) เป็นผู้รับผิดชอบระบบการไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าเป็นหลักในประเทศ อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับก็มีใช้อยู่ทั่วไป เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองในอาคารที่จำเป็นต่อการขาดหายไฟฟ้า ไม่ได้ใช้อย่างเช่น โรงพยาบาล หรือในงานก่อสร้างสนามที่ต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสนาม ก็พบเห็นการใช้งานโดยทั่วไป

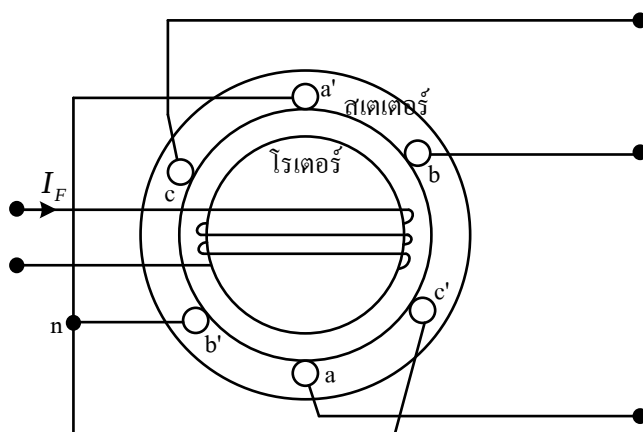
ดังนั้นการศึกษาให้เข้าใจหลักการทำงาน หลักการควบคุม และการบำรุงรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างเรียบร้อย ไม่เกิดการผิดพลาดในการใช้งาน

4.2 โครงสร้างและการทำงาน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนที่สำคัญ คือส่วนที่อยู่ที (stator) และส่วนที่หมุน (rotor)

ส่วนที่อยู่กับที่มักจะออกแบบให้เป็นที่อยู่ของขดลวดหลัก (Armature winding) ขดลวดหลักจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสออกไปให้โหลดทางไฟฟ้า หรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้า ขดลวดนี้จะเป็นลวดเส้นใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับขดลวดสนามในอยู่ในส่วนที่หมุน

ส่วนที่หมุนมักออกแบบให้เป็นที่อยู่ของขดลวดสนาม (Field winding) ขดลวดสนามนี้ทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กหลักในเครื่องกำเนิด สนามแม่เหล็กหลักจะสร้างจากไฟฟ้า กระแสตรงที่มีกระแสไม่มากนัก ดังนั้นจึงเป็นลวดเส้นหลักที่พันอยู่ที่ขดลวดสนามนี้ การออกแบบให้กระแสสร้างสนามแม่เหล็กนี้อาจใช้วิธีการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์เพื่อลดการเชื่อมต่อด้วยแปรงถ่าน

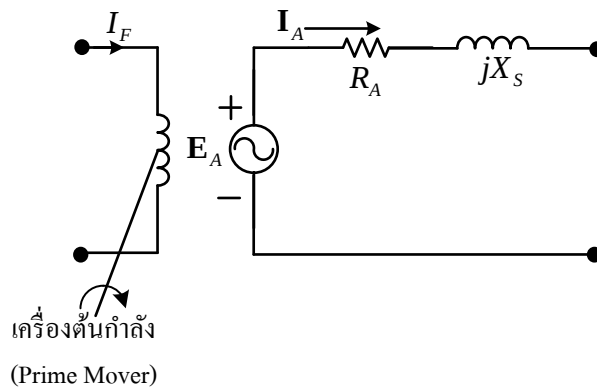


รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ในรูปที่ 4.1 กระแสไฟฟ้า I_F เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าล้งไม่มากนัก ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กขั้วที่แน่นอนที่โรเตอร์ เมื่อโรเตอร์ถูกขุดให้หมุน สนามแม่เหล็กที่แน่นอนนี้จะไปตัดกับขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เราสามารถนำแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ไปจ่ายโหลดทางไฟฟ้าได้

4.3 การไหลของกำลังไฟฟ้า

การไหลของกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ทำให้เราทราบว่ากำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายโหลดทางไฟฟ้าเท่าใดนั้นจะต้องใช้กำลังทางกลเท่าใด เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเป็นแปรรสภาพกำลังทางกลให้เป็นกำลังทางไฟฟ้า ถ้าหากภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีความสูญเสียแล้ว กำลังทางกลที่ใส่เข้าไปให้เครื่องกำเนิดก็จะแปรรสภาพเป็นกำลังทางไฟฟ้าทั้งหมด นั้นหมายถึงเครื่องกำเนิดมีประสิทธิภาพเป็น 100% แต่ในสภาพความเป็นจริง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความสูญเสียต่างๆ เราอาจพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดได้ จากรูปที่ 4.1 เราอาจพิจารณาเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดได้ดังรูปต่อไปนี้

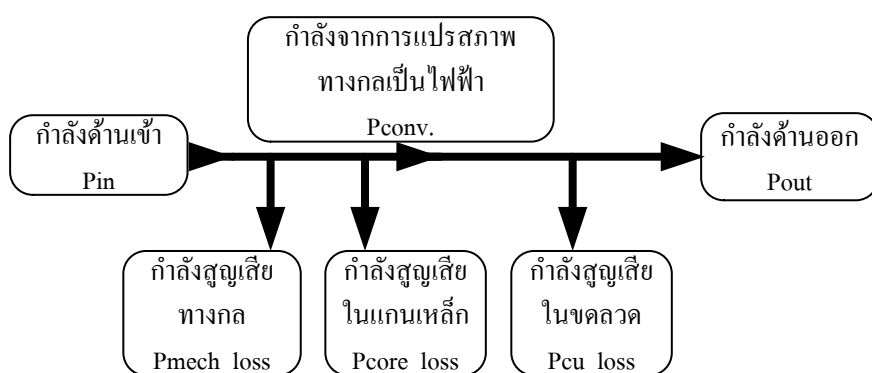


รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในรูปที่ 4.2 เครื่องต้นกำลังอาจเป็นเครื่องยนต์ หรือเครื่องต้นกำลังอะไรก็ได้ ต่ออยู่กับเพลาเครื่องกำเนิด โดยกำลังที่เพลาของเครื่องต้นกำลังก็คือกำลังด้านเข้า (Input power, P_{in}) ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง ในตัวเครื่องกำเนิดจะมีความสูญเสียทางกลอย่างเช่นพวกความฝืดและแรงต้านลม นอกจากนี้ยังมีความสูญเสียทางไฟฟ้าที่ออกมาในรูปความร้อน

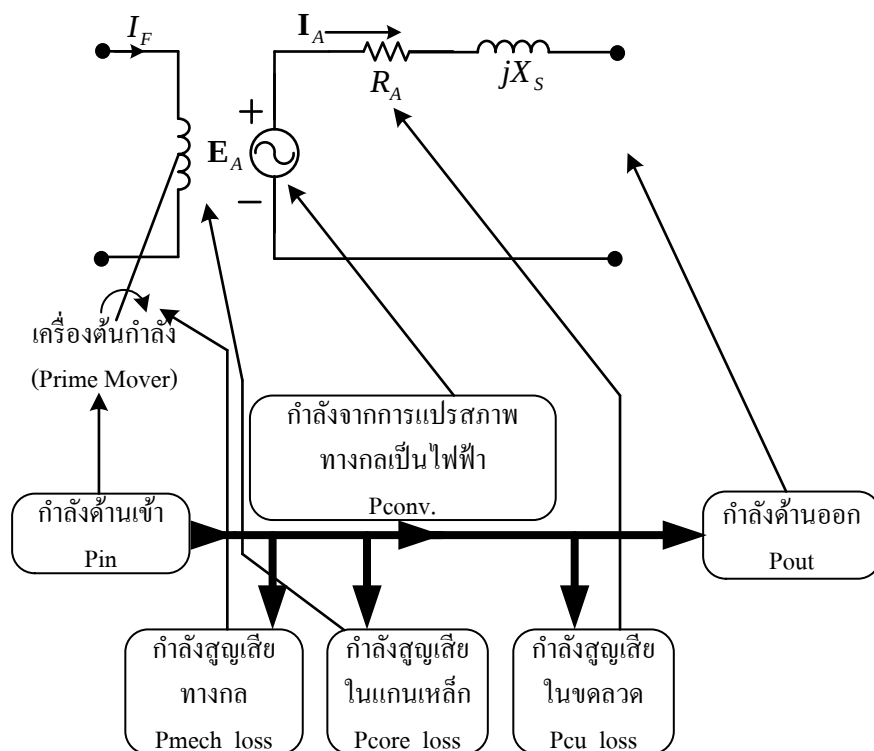
ความสูญเสียทางไฟฟ้าประกอบด้วย การสูญเสียในขดลวดสนาม และขดลวดหลัก นอกจากนี้ยังมีความสูญเสียในแกนเหล็กเหล็กที่สเตเตอร์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปมาที่แกนเหล็กสเตเตอร์นั่นเอง

เมื่อกำลังด้านเข้าถูกหักด้วยกำลังสูญเสียต่างๆ ไปแล้ว ที่เหลือก็จะเป็นกำลังไฟฟ้าด้านออกที่จ่ายให้กับโหลดทางไฟฟ้าต่อไป ดังโฟลว์ชาร์ตการไหลของกำลังไฟฟ้างต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 การไหลของกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะความสัมพันธ์กันอาจเขียนโยงภาพเพื่ออำนวยความสะดวกเข้าใจได้ดังรูปถัดไป ในรูปดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นความเชื่อมโยงของพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดที่สอดคล้องสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าและความสูญเสียต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลกับการไหลของกำลังไฟฟ้า

4.4 การขนานเครื่องกำเนิด

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถเดินเครื่องอยู่ลำพังแล้วจ่ายโหลดได้ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อโหลดทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะต้องมีการขนานเครื่องกำเนิดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยในการจ่ายโหลด การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องตรวจสอบในเรื่องต่อไปนี้

- 1) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะต้องเท่าๆ หรือมากกว่าแรงดันของระบบไฟฟ้าเล็กน้อย
- 2) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสระหว่างเครื่องกำเนิดกับของระบบจะต้องทับกัน
- 3) ลำดับเฟสจะต้องเหมือนกัน และ
- 4) ความถี่ของเครื่องกำเนิดจะต้องมากกว่าความถี่ของระบบเล็กน้อย

จากทั้ง 4 ข้อข้างบนนี้เมื่อเราขนานเครื่องกำเนิดเข้าไปแล้วจะทำให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเราจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบ เพราะการปรับให้แรงดันของเครื่องกำเนิดสูงกว่าแรงดันของระบบจะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าระบบ และการให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดสูงกว่าของระบบจะทำให้เครื่องกำเนิดจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบ

การขนานเครื่องกำเนิดเข้ากับระบบอาจใช้หลอดไฟฟ้า 3 หลอดต่อพร้อมสวิตช์ในแต่ละเฟสเพื่อที่จะต่อเครื่องกำเนิดนั้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือเมื่อหลอดทั้ง 3 ดับสนิทหมด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีเครื่องขนานเครื่องกำเนิดอัตโนมัติที่จะทำการตรวจสอบทั้ง 4 ข้อนี้ก่อน

4.5 บทสรุป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดหลักในระบบไฟฟ้ากำลัง จะใช้เครื่องต้นกำลังเป็นกลุ่มพลังงานดั้งเดิม เช่นฟอสซิลทั้งหลาย หรือเครื่องกำเนิดขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในระบบจำหน่าย (Distributed Generation, DG) ที่ใช้เชื้อเพลิงพวก Biomass หรือ Biogas เป็นต้น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่แล้วจะต้องขนานเข้ากับระบบใหญ่ โดยหลักคิดง่ายๆ คือ ถ้าหากต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบมากๆ เราต้องเร่งให้เครื่องต้นกำลังจ่ายกำลังให้เครื่องกำเนิดที่เพลาลูกมากด้วย

ถ้าหากเราต้องการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายจากเครื่องกำเนิด เราต้องปรับกระแสสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นเพื่อจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าระบบให้มากขึ้น

แบบฝึกหัด

ข้อ 1 จงอธิบายความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าระบบด้วยรูปเฟสเซอร์และสมการที่เกี่ยวข้อง

ข้อ 2 ถ้าหากเราพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีความสูญเสียใดๆ จงเขียนไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดเครื่องนี้

บทที่ 5

มอเตอร์เหนี่ยวนำ

5.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าการบำรุงรักษาที่ต่ำมาก เพราะส่วนที่เคลื่อนที่ไม่มีส่วนใดสัมผัสกับสเตเตอร์เลย จะมีเพียงลูกปืนที่รองรับการหมุนเท่านั้น

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสมีการทำงานและการใช้งานที่สะดวก เพียงป้อนไฟฟ้าเฟส เข้าให้ตัวมอเตอร์ มอเตอร์ก็หมุนทำงานได้ ถ้าหากต้องการกลับทางหมุน สามารถสลับสายไฟฟ้า คู่ใดคู่หนึ่ง ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทางได้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนกลับทางนั่นเอง

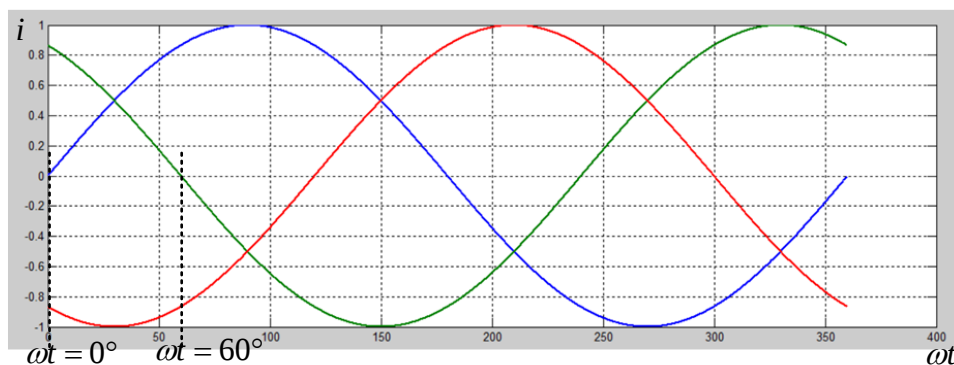
ถ้าหากต้องการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเราสามารถทำได้สะดวก โดยการ ใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ก็จะทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตาม ความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์นั่นเอง

ในบทนี้เราจะขยายความในส่วนต่างๆที่กล่าวไปในบทนำนี้ เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ พฤติกรรมของมอเตอร์ จะได้ประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมต่อไป

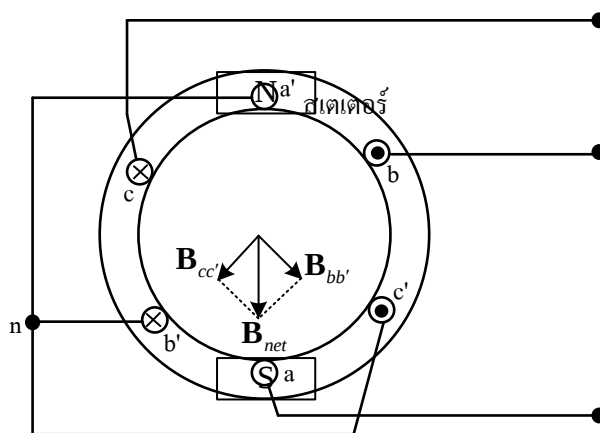
5.2 โครงสร้างและการทำงาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ กับ โรเตอร์ สำหรับสเตเตอร์จะเป็นขดลวดอาร์มาเจอร์ที่มีหน้าที่ในการรับไฟฟ้าจากระบบเข้ามา ส่วนโรเตอร์เป็นส่วนที่หมุน จะอาศัยกำลังที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ โดยกำลังไฟฟ้าจากด้านสเตเตอร์จะส่งไปที่โรเตอร์โดยการเหนี่ยวนำ กำลังที่เหนี่ยวนำได้ที่โรเตอร์จะแปรเปลี่ยนเป็นกำลังทางกลให้โรเตอร์หมุนไปได้ และขับโหลดทางกลได้

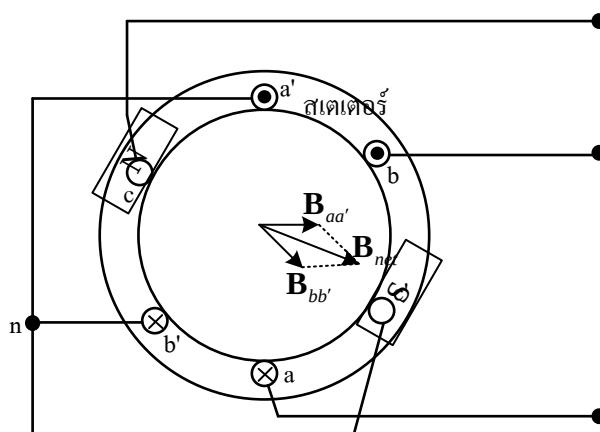
ในส่วนของสเตเตอร์หรืออาร์มาเจอร์ เป็นขดลวด 3 ชุดที่ใช้ในการรับกำลังไฟฟ้า 3 เฟส เข้ามาเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในขดลวด 3 เฟสนี้แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



(a) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสามเฟส



(b) ที่ $\omega t = 0$ องศา ทำให้เสมือนว่าขั้วแม่เหล็ก N อยู่ด้านบน



(c) ที่ $\omega t = 60$ องศา ทำให้เสมือนว่าขั้วแม่เหล็ก N อยู่ด้านบนเอียงซ้าย
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าสามเฟสและสนามแม่เหล็กหมุน

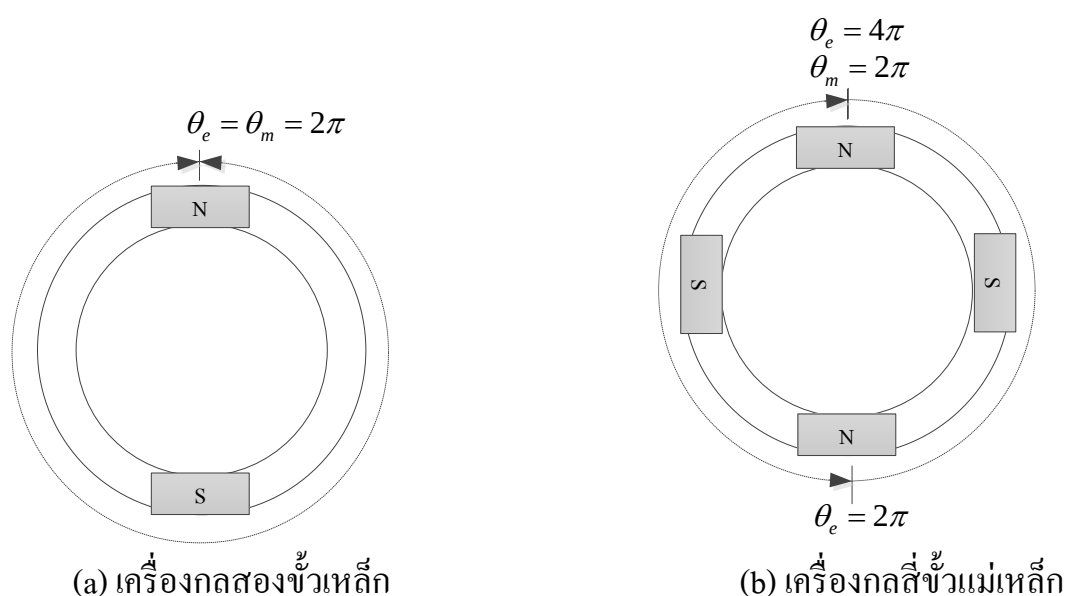
จากรูปที่ 5.1 ในช่วงเวลาที่พิจารณา $\omega t = 0$ องศาในรูป (b) กระแสไฟฟ้าจะไม่มีไหลในขดลวดชุด a แต่จะมีไหลเฉพาะในขดลวดชุด b (เข้าด้านปลายขดลวด) และเข้าที่ขดลวด c (เข้าที่

ต้นขดลวด) กระแสที่ไหลในขดลวดชุด b จะสร้างสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวากำ โดยพิจารณา ให้นิ้วทั้งสี่กำม้วนเข้าตามกระแสไฟฟ้า ทำให้ได้หัวแม่มือที่กางตั้งฉากนั้นเป็นทิศทางของ สนามแม่เหล็ก $\mathbf{B}_{bb'}$ เช่นเดียวกันในขดลวดชุด c สามารถพิจารณาในลักษณะเดียวกัน ทำให้ได้ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดชุด c เป็น $\mathbf{B}_{cc'}$ ดังนั้นเราจึงได้สนามแม่เหล็กสุทธิ $\mathbf{B}_{net}$ ที่เกิดจากการรวมกันทางเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจากทุกขดลวด ซึ่งสนามแม่เหล็กสุทธิ ในเวลานี้อยู่ในทิศทางพุ่งจากบนลงล่างผ่านช่องอากาศที่จะเป็นที่อยู่ของโรเตอร์

ณ ที่ $\omega t = 60$ องศา เราพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับย่อหน้าข้างบน แต่ในขดลวดชุด c จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลแล้ว ดังนั้นทำให้ได้สนามแม่เหล็กสุทธิเป็นดังในรูป (c) ซึ่งมีลักษณะ ขั้วเหล็กเอียงไปทางซ้ายเล็กน้อย

จากรูปที่ 5.1 (b) และ (c) จะเห็นว่าขั้วแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน สนามแม่เหล็กหมุนนี้เปรียบเสมือนการมีขั้ว เหล็กหมุนอยู่ในสเปซช่องวงกลมนั้นนั่นเอง ถ้าหากเรามีการสลับสายไฟฟ้าที่ป้อนกระแสไฟฟ้า เข้าขดลวดคู่ใดคู่หนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น สลับสายเฟส b กับ c ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนกลับ ทาง ลักษณะนี้จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสหมุนกลับทางได้นั่นเอง

ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนนั้น จะขึ้นอยู่กับความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ ขดลวด อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเร็วรอบจะมีความซับซ้อนสักเล็กน้อย สามารถอธิบาย ได้ด้วยรูปภาพต่อไปนี้



(a) เครื่องกลสองขั้วเหล็ก

(b) เครื่องกลสี่ขั้วแม่เหล็ก

รูปที่ 5.2 มุมทางไฟฟ้าและทางกลสำหรับการอธิบายความเร็วรอบ

ถ้าหากเป็นเครื่องกลไฟฟ้า 2 ขั้วแม่เหล็กดังรูปที่ 5.2 (a) นั้น ในหนึ่งรอบทางไฟฟ้า (จาก กึ่งกลางขั้ว N ถึงกึ่งกลางขั้ว N) จะเท่ากับหนึ่งรอบทางกล แต่ถ้าหากเป็นเครื่องกล 4 ขั้วแม่เหล็กแล้ว ในหนึ่งรอบทางกลจะมีค่าเท่ากับสองรอบทางไฟฟ้า อาจอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m; f_e = \frac{P}{2} f_m; f_m = \frac{N_s}{60}$$

$$f_e = \frac{P}{2} \cdot \frac{N_s}{60} = \frac{P \cdot N_s}{120}$$

$$\boxed{N_s = \frac{120 f_e}{P}} \quad (5.1)$$

เมื่อสมการ N_s ที่ได้นี้เป็นความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (ทางกล) หน่วยเป็นรอบต่อวินาที (เป็นค่าที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ) สำหรับ θ เป็นค่ามุม f_e เป็นความถี่ไฟฟ้าหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) (รอบต่อวินาที) f_m เป็นความเร็วรอบทางกลหน่วยเป็นรอบต่อวินาที และ P เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้า

สมการที่ (5.1) นี้เป็นสมการที่สำคัญในการอธิบายเรื่องความเร็วรอบของเครื่องกลไฟฟ้า กระแสสลับชนิดต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำเครื่องหนึ่งระบุว่ามีความเร็วรอบ 1,380 รอบต่อวินาที ซึ่งในระบบไฟฟ้า 50Hz 4 ขั้วแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กหมุนจะมีค่าเป็น 1,500 รอบต่อวินาที แต่ในทางปฏิบัติของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำนี้ มอเตอร์จะมีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนอยู่เล็กน้อย สาเหตุที่น้อยกว่าเพราะตัวนำที่โรเตอร์จะต้องตัดกับสนามแม่เหล็กหมุน เพื่อให้เกิดกระแสในโรเตอร์และเกิดแรงบิดหมุนไปได้

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้ง่ายๆ ดังต่อไปนี้:

- เมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้าสามเฟสเข้าขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์
- จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วรอบเป็น N_s รอบต่อวินาที ตามสมการที่ (5.1)
- สนามแม่เหล็กหมุนจะไปตัดกับตัวนำที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนตัวนำที่อยู่บนโรเตอร์ ตามหลักการของสมการพื้นฐาน $e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$

- ตัวนำบนโรเตอร์มีการลัดวงจรหั่วท้าย จึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนั้น

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้นมาบนตัวนำตามสมการพื้นฐาน

$$\tau_{ind} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

- ตัวนำบนโรเตอร์มีการเคลื่อนที่ ทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ N_R ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน N_S อยู่เล็กน้อย

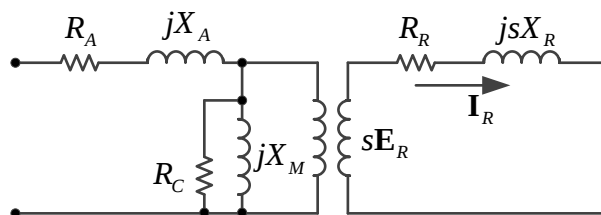
จากการที่ความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน เราจะเรียกว่าสลลิป (Slip, s) ค่าสลลิปนี้เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$s = \frac{N_S - N_R}{N_S} \quad (5.2)$$

ซึ่งค่าสลลิป s นี้มีความสัมพันธ์กับการทำงานของมอเตอร์ดังต่อไปนี้:

- ถ้าช่วงสตาร์ทหรือเริ่มเดิน $s = 1$ เพราะ N_R เป็น 0
- ถ้ามอเตอร์หมุนขณะไม่มีโหลด $s \approx 0$ เพราะ N_R มีค่าใกล้เคียงกับค่า N_S

จากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่ประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์ที่มีหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าสามเฟสแล้วสร้างสนามแม่เหล็กหลักหมุน สนามแม่เหล็กหมุนไปตัดกับขดลวดโรเตอร์ที่ลัดวงจรถึงกันหมด จนเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่โรเตอร์และมีกระแสไหลขึ้น แรงบิดเหนี่ยวนำจึงเกิดขึ้นทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ เราจึงเขียนเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็นดังรูปต่อไปนี้

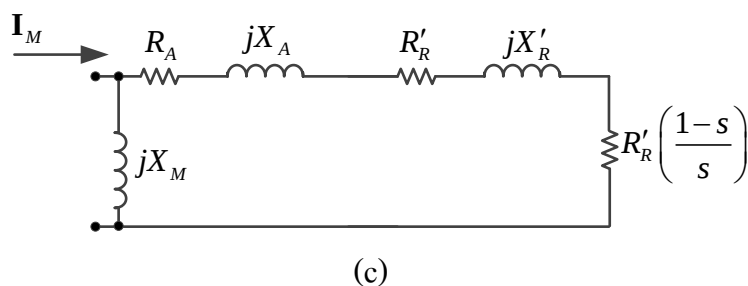
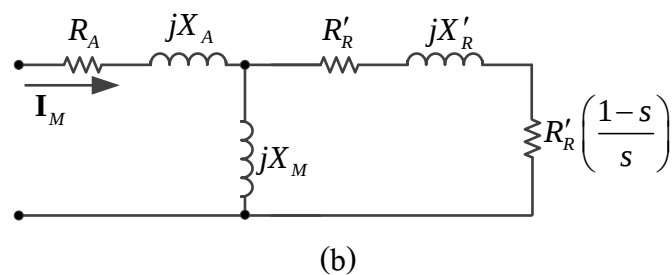
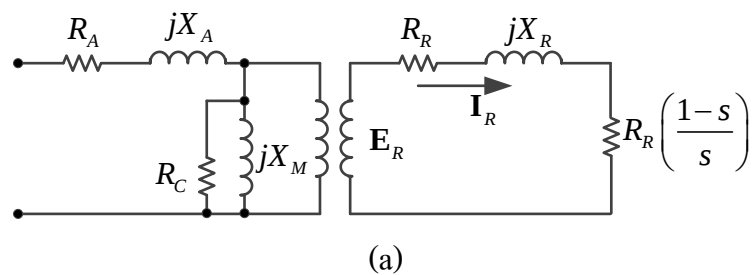


รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรด้านฝั่งขวามือของรูปที่ 5.3 เป็นวงจรที่จำลองในส่วนของโรเตอร์ ในส่วนของโรเตอร์นี้อาจพิจารณาให้ง่ายขึ้นได้ดังต่อไปนี้

$$I_R = \frac{sE_R}{R_R + jsX_R} = \frac{E_R}{\left(\frac{R_R}{s}\right) + jX_R} = \frac{E_R}{\left(R_R + R_R \frac{(1-s)}{s}\right) + jX_R} \quad (5.3)$$

สมการกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ในสมการที่ (5.3) นี้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าสลิปด้วย การพิจารณาแยกส่วนของความต้านทานโรเตอร์ออกเป็น 2 ส่วนเพื่อที่จะจำลองส่วนแรกเป็นความสูญเสียในขดลวดที่โรเตอร์ และส่วนที่สองเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่เหลือ ซึ่งจะแปรสภาพเป็นกำลังทางกลที่จะไปขับโหลดนั่นเอง จากสมการที่ 5.3 จึงเขียนเป็นรูปวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.4 (a)



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการพิจารณาให้สะดวกขึ้น

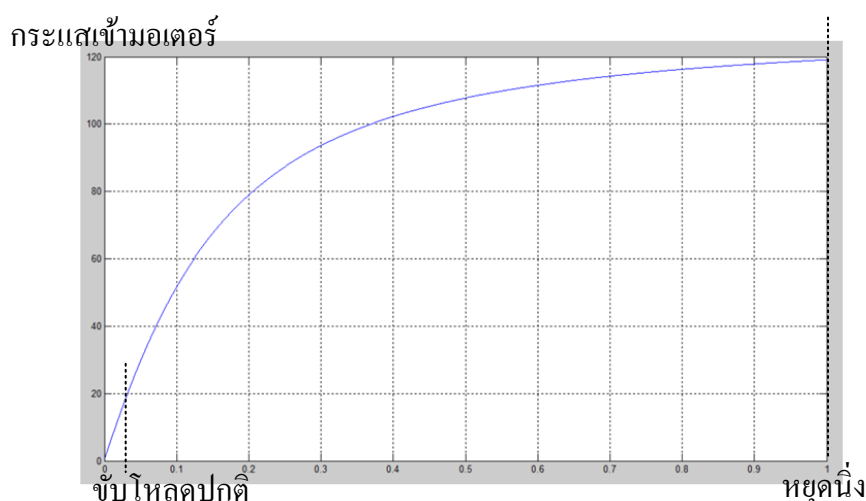
ในรูปที่ 5.4 (b) เป็นวงจรโดยประมาณของวงจรในรูป (a) เพราะตัดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กออกไป และมีการย้ายค่าพารามิเตอร์ในส่วนของโรเตอร์ไปไว้ที่ด้านสเตเตอร์ การย้ายค่าพารามิเตอร์อาศัยหลักการเหมือนในหม้อแปลงไฟฟ้า

นอกจากนี้ในรูป (c) เป็นการประมาณมากขึ้นเพื่อความสะดวกต่อการอธิบายวงจร โดยมีการย้ายพารามิเตอร์ส่วนของการสร้างสนามแม่เหล็กไปไว้ด้านสุดของวงจร โดยปกติแล้วกระแสสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่ากระแสขั้วมอเตอร์ขณะขับโหลดมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติเราสามารถกระทำการย้ายลักษณะนี้ได้

เมื่อวงจรสมมูลเป็นดังรูปที่ 5.4 (c) เราจึงจะวิเคราะห์ต่อเพื่อที่จะหาค่าแรงบิดที่จะขับโหลดได้นั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร โดยการพิจารณาเริ่มจากการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ โดยประมาณมีค่าเป็น

$$\mathbf{I}_M = \frac{V_M}{R_A + \left(\frac{R'_R}{s} \right) + j(X_A + X'_R)} \quad (5.4)$$

สมการกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์นี้สามารถนำมาพิจารณากระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ตั้งแต่เริ่มเดิน จนกระทั่งถึงสภาวะที่มอเตอร์ขับโหลดที่สภาวะคงตัว โดยการพิจารณาให้ $s = 1$ เรื่อยลงไปถึงค่า s ที่ใกล้ “0” จะมีลักษณะดังรูป



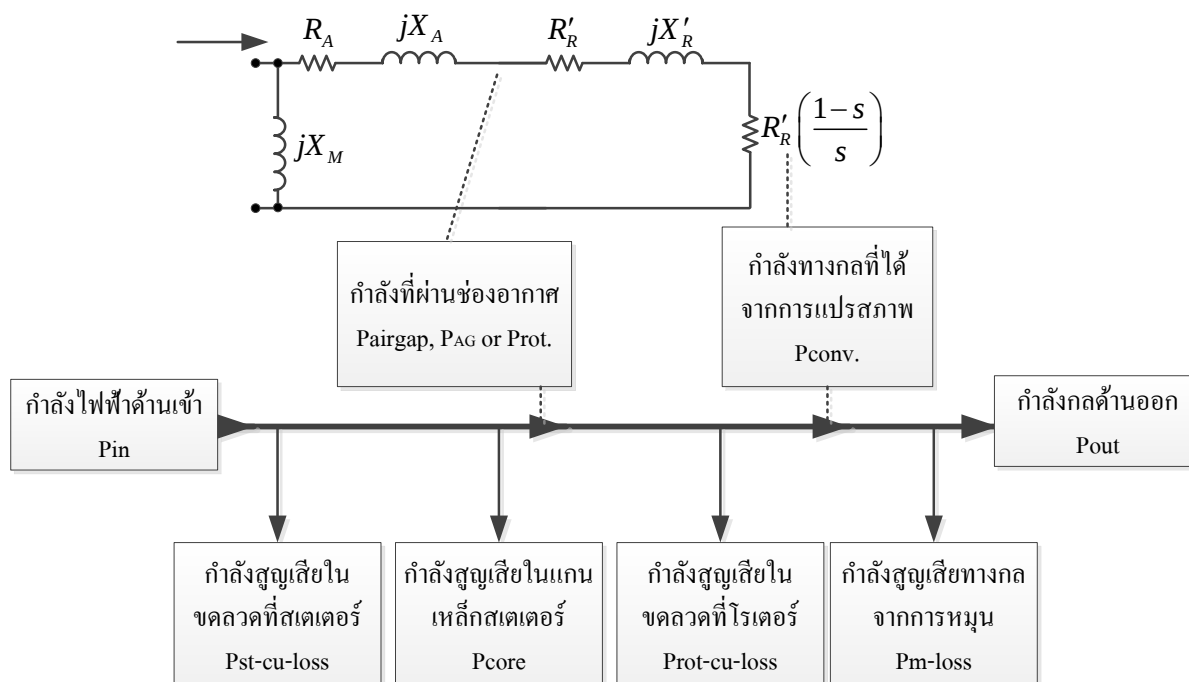
รูปที่ 5.5 ลักษณะกระแสเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำทุกสภาวะ

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าในตอนเริ่มเดินที่ป้อนแรงดันให้มอเตอร์แบบทันทีทันใด มอเตอร์จะมีกระแสเข้ามอเตอร์สูงที่สุด เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไปกระแสเข้ามอเตอร์จะมีค่าลดลง และไปมีค่ากระแสคงที่ที่จุดขับโหลดปกติค่าหนึ่ง ถ้าหากเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ปริมาณกระแสสตาร์ทนี้จะมีค่าสูง อาจทำให้ระบบไฟฟ้าทั้งโรงงานอาจกระพริบได้ ดังนั้นวงจรการเริ่มเดินมอเตอร์จึงมีความสำคัญ โดยวงจรเริ่มเดินนี้อาจจะทำการลดแรงดัน หรือเป็นวงจรเริ่มเดินแบบนุ่มนวล (Soft start circuit) ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อช่วยลดกระแสสตาร์ทนั่นเอง

5.3 การไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้เราทราบว่า ถ้าหากเรามีโหลดทางกลอยู่ขนาดเท่าใด เราจะต้องจัดหามอเตอร์ขนาดเท่าใดเพื่อมาขับโหลดทางกลนี้ ที่ตัวมอเตอร์เองจะมีความสูญเสียจะออกมาในรูปความร้อน ซึ่งถ้าหากมอเตอร์มีความร้อนที่มากเกินไป (เกินกว่าอุณหภูมิทำงานปกติ) เราสามารถสันนิษฐานได้ว่ามอเตอร์เราเกิดความผิดปกติขึ้นแน่นอน

การพิจารณาการไหลของกำลังที่จะไปขับโหลดทางกล อาจพิจารณาจากวงจรสมมูลก็ได้ จะทำให้การพิจารณานั้นสะดวกมากดังภาพประกอบต่อไปนี้



รูปที่ 5.6 การไหลของกำลังไฟฟ้าเทียบกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 5.6 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าอยู่ที่ด้านซ้ายมือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์จะเกิดความสูญเสียในขดลวด ในแกนเหล็กสเตเตอร์นี้จะมีการกลับตัวไปมาของขั้วแม่เหล็กเล็กๆ ดังนั้นจึงเกิดเป็นความสูญเสียในแกนเหล็กขึ้นด้วยเช่นกัน ความสูญเสียทั้งสองอย่างนี้จะออกมาในรูปของความร้อน สามารถสัมผัสได้ที่โครงของมอเตอร์ ดังนั้นที่โครงของมอเตอร์จึงนิยมออกแบบเป็นครีบบนเพื่อให้มีการระบายความร้อนที่ดียิ่งขึ้น

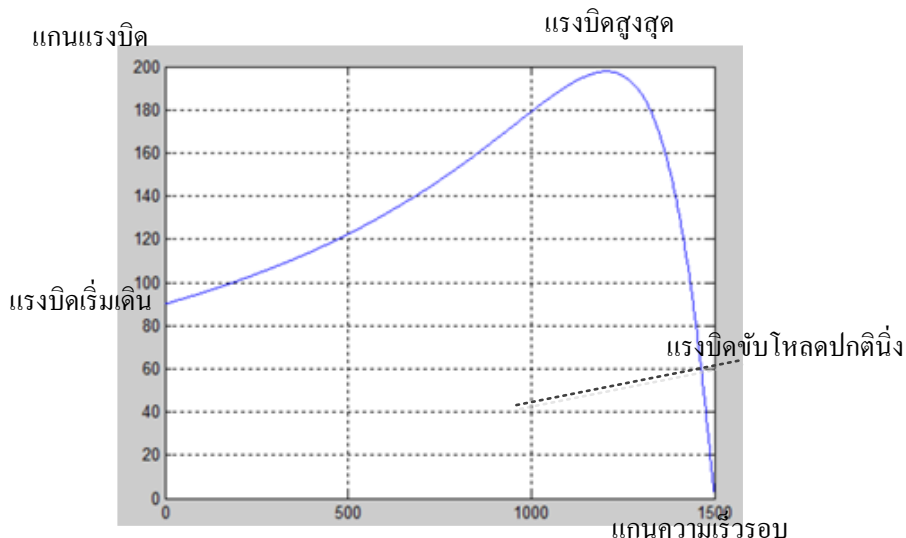
กำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศนั้นเป็นลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ส่งผ่านช่องอากาศจากสเตเตอร์ไปที่โรเตอร์นั่นเอง เมื่อกำลังไหลผ่านขดลวดที่โรเตอร์ก็จะมี ความสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ ดังนั้นกำลังที่เหลือจะถูกแปรสภาพเป็นกำลังทางกล เพื่อที่จะขับโหลดทางกลนั่นเอง อย่างไรก็ตามก่อนที่จะขับโหลดจะมีความสูญเสียเนื่องจากการหมุน อาทิเช่นความฝืดเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นกำลังที่ขับโหลดจริงจะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการแปรสภาพมาเล็กน้อย

5.4 การเริ่มเดินและการควบคุม

มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่จะมีกระแสไฟฟ้าเริ่มเดินสูงมาก ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่สูงนี้อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ามีค่าลดลงได้ แรงดันที่ลดลงนี้อาจส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอื่นได้รับความเสียหาย ดังนั้นเราจึงต้องมีวิธีการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามการลดแรงดันเพื่อการเริ่มเดินมอเตอร์จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงด้วย สมการแรงบิดของมอเตอร์หาได้จาก

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \approx I_M^2 R'_R \frac{(1-s)}{s\omega_m} = I_M^2 R'_R \frac{(1-s)}{s\omega_s(1-s)} = \frac{I_M^2 R'_R}{s\omega_s} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (5.5)$$

สมการที่ (5.5) นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิด ถึงแม้เราจะพิจารณาโดยประมาณ แต่ก็ถือว่ามีความใกล้เคียงกับความจริงมาก เพราะค่าพารามเตอร์ส่วนขนานที่ย้ายค่าไปอยู่ด้านหน้าของวงจรมีค่ามากกว่าส่วนอนุกรมของวงจรมาก ดังนั้นส่วนกระแสที่ไหลเข้าส่วนขนานจะไม่มีผลต่อส่วนอนุกรมมากนัก ถ้าหากเรานำสมการที่ (5.5) นี้มาเขียนเป็นรูปกราฟของแรงบิด จะได้แรงบิดของมอเตอร์ตั้งแต่เริ่มเดินไปจนถึงจุดขับโหลดปกติเป็นดังรูป



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แรงบิดเริ่มต้นในรูปที่ 5.7 จะเห็นว่ามีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้นมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำทั่วไปแล้วเรามักให้เริ่มเดินแบบไม่มีโหลดทางกลที่ต่ออยู่ที่เพลา

สำหรับแรงบิดสูงสุดนั้นจะเกิดขึ้นก่อนที่มอเตอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มอเตอร์ขับโหลดปกติ ถ้าหากเราสามารถทำให้แรงบิดสูงสุดมาเกิดขึ้นในช่วงเริ่มเดินได้ จะทำให้มอเตอร์ชนิดนี้สามารถเริ่มเดินได้แม้จะมีโหลดทางกลต่ออยู่ที่เพลาหนักๆก็ตาม ในทางปฏิบัติเราสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ออกแบบให้ความต้านทานโรเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามการหมุน และเพิ่มค่าความต้านทานโรเตอร์เข้าไปที่โรเตอร์ (ทำได้กรณีเป็นแบบโรเตอร์มีขดลวด) ทั้งสองวิธีนี้แสดงให้เห็นชัดเจนได้ด้วยสมการแรงบิดสูงสุด โดยพิจารณาจากการพิจารณาเพิ่มเติมจากสมการที่ (5.5)

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} = \frac{I_M^2 R'_R}{s\omega_s} = \left(\frac{V'_R}{R'_R/s + jX'_R} \right)^2 \cdot \frac{R'_R}{s\omega_s} \quad (5.6)$$

สมการที่ (5.6) นี้สามารถแสดงออกถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ในหลายมิติ และพิจารณาเพื่อการปรับคุณสมบัติของมอเตอร์ได้ ทั้งในแง่การควบคุมมอเตอร์ และการออกแบบสร้างมอเตอร์

ถ้าหากเราลดค่าแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์เครื่องหนึ่ง จะเห็นว่าแรงบิดจะลดลงเหลือแค่ $1/4$ ของแรงบิดขณะแรงดันเต็มพิกัดเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมหรือเริ่มเดินมอเตอร์ด้วยการลดค่าแรงดัน อาจทำให้มอเตอร์เริ่มเดินไม่ได้ เพราะค่าแรงบิดลดลงนั่นเอง

ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความสำคัญ เพราะนอกจากจะได้ความเร็วรอบตามความต้องการแล้ว การอนุรักษ์พลังงานก็ได้รับเช่นกัน การควบคุมความเร็วรอบสมัยใหม่จะใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งส่งผลให้ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนเปลี่ยนแปลงด้วย ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงเปลี่ยนแปลงด้วย อย่างไรก็ตามในวิธีการนี้เราต้องควบคุมให้แรงดันต่อความถี่ (V/f) มีค่าคงที่ เพราะค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กมอเตอร์ควรมีค่าคงที่ เพื่อให้สามารถขับโหลดที่แรงบิดคงที่ได้ ความสัมพันธ์ที่อธิบายส่วนนี้คือสมการ $v = N \frac{d\phi}{dt}$ โดยเทคโนโลยีเหล่านี้รู้จักในนามชื่อทางการค้าเช่น อินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ หรือ การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า หลักการนี้ก็มีการใช้ระบบยานยนต์ไฟฟ้า หรือ ระบบรางทั้งหลายด้วย

วิธีการเริ่มเดินอย่างง่ายจะเป็นการเริ่มเดินแบบโดยตรง (Direct online, DOL) วิธีนี้เป็น การต่อแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าโดยตรงกับมอเตอร์เลย ไม่ได้มีการลดกระแสสตาร์ทแต่อย่างใด

วิธีการเริ่มเดินแบบสตาร์เดลต้า (Star-delta starting) การเริ่มเดินแบบนี้เป็นการลดระดับแรงดันที่ป้อนให้ขดลวดของมอเตอร์ กล่าวคือในตอนเริ่มเดินมอเตอร์จะต่อแบบสตาร์ ซึ่งแรงดันที่ขดลวดมอเตอร์จะรับไปเพียง $1/\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันขณะเดินปกติ (คือแบบเดลต้า)

5.5 บทสรุป

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมในงานอุตสาหกรรม ในงานยานยนต์ไฟฟ้าทั้งหลาย เพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีค่าการบำรุงรักษาดำรงมาก เนื่องจากที่ฝั่งโรเตอร์นั้นไม่มีส่วนที่สัมผัสกับสเตเตอร์เลย การควบคุมความเร็วรอบทำได้ง่ายโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น คอนเวอร์เตอร์เป็นต้น ในปัจจุบันแพร่หลายกันมาก

แบบฝึกหัด

- ข้อ 1. จงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- ข้อ 2. จงอธิบายพร้อมสมการที่เกี่ยวข้องของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องอากาศ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดโรเตอร์ และกำลังที่แปรสภาพเป็นกำลังทางกล

ข้อ 3. จงแสดงให้เห็นด้วยสมการที่กล่าวว่า หาก V/f คงที่แล้ว จะทำให้สนามแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงที่

บทที่ 6

การปรับแก้ตัวประกอบกำลัง

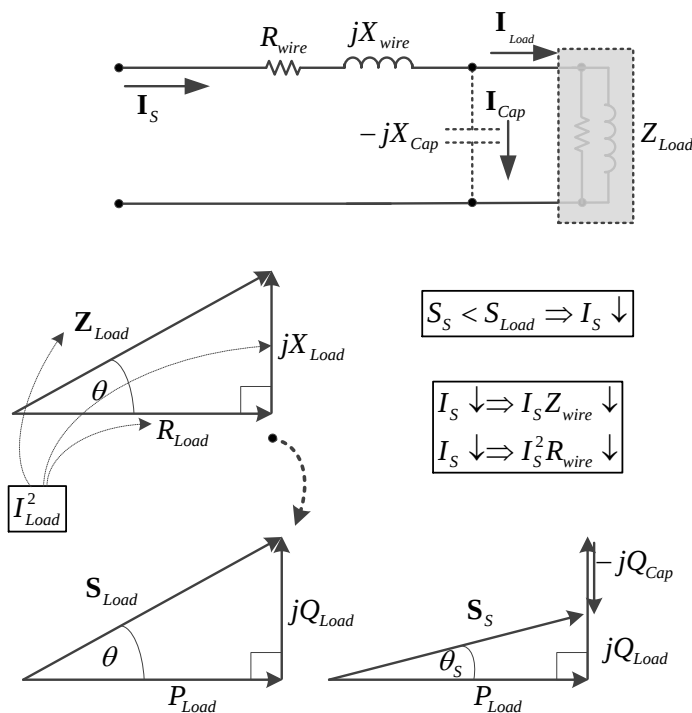
6.1 บทนำ

ตัวประกอบกำลัง (power factor) เป็นตัวประกอบที่มีค่าเป็น 1 จะถือว่าดีมากในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะการส่งกำลังไฟฟ้าไปที่โหลดจะได้ส่งมาเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง ไม่ต้องส่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมาให้โหลด การส่งกำลังไฟฟ้าจริงคือกำลังที่จำเป็นต่อการใช้งานให้เกิดประโยชน์ของโหลด การส่งกำลังรีแอกทีฟรวมมาด้วยทำให้กระแสไฟฟ้ารวมมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นความสูญเสียในสายส่ง สายจำหน่าย และในอุปกรณ์ส่งจ่ายมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้แรงดันตกก็จะมีมากขึ้นด้วย ทำให้แรงดันปลายสายมีค่าลดลง

ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับตัวประกอบกำลัง การปรับแก้ตัวประกอบกำลัง และอุปกรณ์ที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการปรับแก้ตัวประกอบกำลัง

6.2 ความสำคัญของตัวประกอบกำลัง

ดังได้กล่าวในบทนำถึงความสำคัญของตัวประกอบกำลังไปแล้ว เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนในหัวข้อนี้จึงเสนอเป็นรูปแบบจำลอง รูปภาพ และสมการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 การปรับแก้ตัวประกอบกำลัง

ในรูปที่ 6.1 แสดงเฟสเซอร์ที่เป็นโดยประมาณว่า กำลังไฟฟ้าที่โหลดประมาณเท่ากับ กำลังที่ส่งไปโดยแหล่งจ่าย ในความเป็นจริงจะมีส่วนความสูญเสียในสายส่งภายในอาคารและ แรงดันตกคร่อมสายภายในอาคารด้วย โดยปกติโหลดทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย RL เมื่อเรานำ ตัวเก็บประจุซึ่งมีพฤติกรรมตรงข้ามกับตัวเหนี่ยวนำ จะทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏที่เข้ามามีค่า ลดลง เมื่อพิจารณาว่าแรงดันค่อนข้างคงที่ นั่นคือกระแสไฟฟ้ารวมมีค่าลดลงนั่นเอง การลดลง ของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดันตกในสายไฟฟ้าลดลง และกำลังสูญเสียในสายไฟฟ้าลดลง

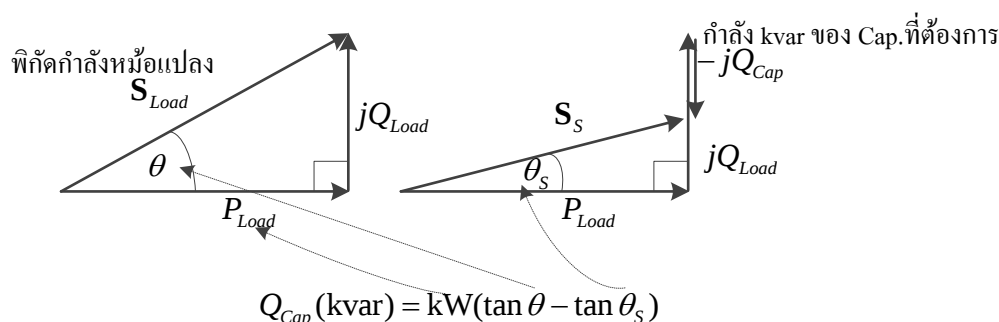
การปรับแก้ตัวประกอบกำลังทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลงหรือไม่ เป็นคำถามที่ ประชาชน หรือผู้ใช้ไฟฟ้ามักพบเจอ หรือพบผู้มาหลอกลวงขายอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน ทั้งที่ จริงๆแล้วภายในอุปกรณ์เป็นเพียงตัวเก็บประจุที่อาจเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าลดลง (ถ้าไม่ เหมาะสมกระแสไฟฟ้าอาจสูงกว่าปกติ) ค่าพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) คูณ กับเวลาเป็นชั่วโมงที่ใช้งาน ดังนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะลดลงได้ก็จะเกิดจากความสูญเสียที่ ลดลงเท่านั้น โดยปกติจะมีค่าน้อยมากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนซื้อตัวเก็บประจุมาติดตั้ง ทาง การ ไฟฟ้าก็เลยมีมาตรการปรับโทษกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเป็นค่า kvar charge โดยปกติจะเก็บค่า kvar ละ 56.07 บาท [1] เฉพาะส่วนที่เกินจากตัวประกอบกำลังต่ำกว่า 0.85 ถ้าหลัง ($\text{kvar/kW} = 0.6197$) กล่าวง่ายๆคือ เราต้องพยายามรักษาควบคุมให้โรงงานของเรามีตัวประกอบกำลังไม่ต่ำ กว่า 0.85 ถ้าหลังนั่นเอง

6.3 การคุมตัวประกอบกำลังอัตโนมัติ

การควบคุมตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุดคือต้องติดตั้งตัวเก็บประจุให้ใกล้กับโหลดที่มี องค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำให้มากที่สุด เพราะปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ลดลงนั้นจะได้เดินทาง ในสายไฟฟ้าได้ไกลที่สุด ความสูญเสียและแรงดันตกในสายจะได้ดีขึ้น แต่ในทางปฏิบัติกระทำ ได้ลำบาก เพราะพื้นที่จำกัด การควบคุม และการบำรุงรักษา ในทางปฏิบัติมักติดตั้งชุดปรับแก้ ตัวประกอบกำลังอัตโนมัติที่ตู้จ่ายไฟหลัก (MDB) ซึ่งเป็นการปรับแก้ตัวประกอบกำลังใน ภาพรวมทั้งระบบ

การปรับแก้ตัวประกอบกำลังอัตโนมัติจะประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจจับกำลังไฟฟ้า ตัว ประมวลผล อุปกรณ์ตัดต่อควบคุม และตัวเก็บประจุแบบขึ้น การเลือกขนาดระบบปรับแก้ตัว ประกอบกำลังจะสัมพันธ์กับขนาดของกำลังไฟฟ้าจริง และตัวประกอบกำลังเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การตามโหลดทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามการใช้งาน ดังนั้นเราอาจประมาณการตามขนาดหม้อ

แปลงไฟฟ้าที่ใช้กิจการนั้นๆ ได้ โดยเราอาจประมาณว่าหม้อแปลงถูกออกแบบให้ใช้งานที่ 80% ของพิกัด และมีตัวประกอบกำลังเริ่มต้นประมาณ 0.75 ล้าหลัง เป้าหมายตัวประกอบกำลังหลังการปรับปรุงเป็น 0.95 ล้าหลัง เป็นต้น



ขนาดหม้อแปลง (kVA)	80% ของพิกัด (kVA)	กำลังไฟฟ้าจริง (kW) ณ 0.75 ล้าหลัง	กำลังรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุที่ต้องการ (kvar) ณ 0.95 ล้าหลัง
500	400	300	166
1,000	800	600	332
1,500	1,200	900	498
2,000	1,600	1,200	664

รูปที่ 6.2 เฟสเซอร์และผลการคำนวณค่าการปรับแก้ตัวประกอบกำลัง

จากรูปที่ 6.2 เป็นการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายในประเทศไทย 22,000/400-230 โวลต์ต่อแบบ Dy11n ปริมาณกำลังรีแอคทีฟที่คำนวณได้นั้นเป็นค่าทั้งสามเฟส

ในทางปฏิบัติระบบการปรับแก้ตัวประกอบกำลังนี้จะแบบสแต็บของตัวเก็บประจุ การเลือกตัวเก็บประจุไม่จำเป็นจะต้องมีค่าตรงกับค่าที่คำนวณมากนักก็ได้ เพราะโหลดของทั้งโรงงานมักเปลี่ยนแปลงเป็นปกติอยู่แล้ว แต่การเลือกสแต็บของตัวเก็บประจุถ้าเลือกให้ยิ่งละเอียดมากก็จะสามารถปรับแก้ให้ละเอียดได้นั่นเอง

6.4 บทสรุป

บทนี้ได้แสดงและเสนอแนะการปรับแก้ตัวประกอบกำลัง โดยเน้นที่โรงงานขนาดใหญ่ เพราะในทางปฏิบัติมีการปรับโทษผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าล้าหลังมากๆ ในฐานะ

ผู้บริหารโรงงานต้องเข้าใจและเห็นความสำคัญของการปรับแก้ตัวประกอบกำลัง และควรเลือกใช้นาฬิกาเท่าใด ส่วนในเรื่องเทคนิคที่มีรายละเอียดมากขึ้น ก็ให้ผู้ที่เกี่ยวข้องพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้ถ้าหากเป็นโรงงานที่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมากมายอาจจะต้องมีการปรับแก้เรื่องฮาร์โมนิกส์ด้วย ซึ่งอาจรวมอยู่ในชุดปรับแก้ตัวประกอบกำลังนี้ก็ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] https://esd.pea.co.th/pdf/electricity_rate_58_02.pdf // อัตราค่าไฟฟ้าจำแนกตามกิจการไฟฟ้า

บทที่ 7

พื้นฐานการออกแบบระบบไฟฟ้า

7.1 บทนำ

การออกแบบระบบไฟฟ้าในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในอาคาร หรือนอกอาคาร ในระดับแรงดันจำหน่ายทฤษฎี (220V) ที่เราใช้งานบ่อยที่สุด อย่างไรก็ตามก็ เป็นพื้นฐานเดียวกันในการออกแบบระบบไฟฟ้าทั่วไป

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าในประเทศจะมีมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้าของ วสท. เป็นแนวทางบังคับในการออกแบบ อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบไฟฟ้าเราต้องพิจารณา มาตรฐานของการไฟฟ้าร่วมด้วย ประกอบด้วย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) โดยการออกแบบระบบไฟฟ้าเราจะถือว่าเป็นงานวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม อย่างไรก็ตามในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจมีการต่อเติม หรือการใช้งานอย่างเร่งด่วน อาจไม่มี วิศวกรไฟฟ้าที่รับผิดชอบโดยตรงอยู่ในสถานที่นั้น ผู้ที่เกี่ยวข้องในสถานที่นั้นก็ควรมีความรู้ เบื้องต้นพอที่จะให้การใช้งานพอดำเนินการไปได้

ในบทนี้จึงนำเสนอพื้นฐานการออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคาร สิ่งสำคัญก็คือเทคนิคการ พิจารณาเลือกสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าที่สอดคล้องสัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังกล่าวถึง สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคาร ซึ่งจะเน้นประโยชน์ต่อผู้ที่เขียนแบบระบบไฟฟ้า ในอาคารได้ด้วย อย่างเช่นสถาปนิก และวิศวกรโยธา เป็นต้น

7.2 การเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันและสายไฟฟ้า

อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าหมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติ หรือต้องการควบคุมระบบไฟฟ้า ในปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันที่นิยมคือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker, CB) โดย CB จะมีฟังก์ชันการตัดวงจรเป็นแอมป์ทริป (AT) ยกตัวอย่างเช่น CB ขนาด 20AT หมายถึง ถ้าหากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน CB เป็น 20A ตัว CB จะปลดวงจร ดังนั้นในการ ออกแบบเราจะให้กระแสใช้งานปกติอยู่ที่ไม่เกิน 80% ของ AT ของ CB เท่านั้น

สายไฟฟ้าที่นิยมใช้ในอาคารจะมีอยู่ไม่กี่ชนิด โดยตัวนำของสายไฟฟ้าจะเป็นทองแดง แต่ถ้าหากเป็นนอกอาคารมักนิยมใช้อลูมิเนียมเพราะน้ำหนักเบา ซึ่งการติดตั้งนอกอาคารที่ติดตั้ง

บนเสาไฟฟ้า จึงใช้ชนิดอลูมิเนียม ฉนวนไฟฟ้าที่หุ้มตัวนำไฟฟ้ามีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นตัวบ่งบอกว่าสายไฟฟ้าชนิดนี้สามารถติดตั้งได้ที่ใดบ้าง

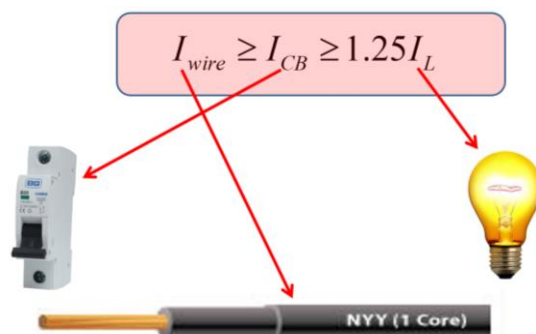
สาย IEC01 เป็นสายไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ตัวนำทองแดง และฉนวนไฟฟ้าหนึ่งชั้น สายชนิดนี้นิยมใช้งานมาก การติดตั้งจะต้องติดตั้งในท่อร้อยสายไฟ หรือช่องทางเดินสายไฟเช่นวาวเย็บเป็นต้น

สาย IEC10 เป็นสายไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ตัวนำทองแดง ฉนวน และเปลือก เมื่อคู่ด้วยตา สายไฟนี้เหมือนมีฉนวนสองชั้น สายไฟฟ้าชนิดสามารถบนรางเดินสายแบบบับไดได้ ติดตั้งได้เฉพาะในอาคาร

สาย NYY เป็นสายที่ดูเหมือน IEC10 มาก แต่จะทนรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่า สามารถติดตั้งในและนอกอาคารได้ สามารถฝังดินโดยตรง หรือแช่ในน้ำได้

สาย CV หรือ IEC60502-1 เป็นสายไฟฟ้าที่ใช้งานได้เช่นเดียวกันกับ NYY แต่จะได้รับความนิยมมากกว่า เพราะมีคุณสมบัติในเรื่องการทนไฟได้ด้วย

ในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกัน และสายไฟฟ้า จะต้องมีความสัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าของโหลดด้วย เพื่อสอดคล้องความเข้าใจ ให้ดูรูปต่อไปนี้



รูปที่ 7.1 การเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกัน และสายไฟฟ้า

จากรูปที่ 7.1 กระแสไฟฟ้าของโหลด I_L เป็นสิ่งที่ต้องทราบหรือคำนวณหาเป็นอันดับแรก ต่อจากนั้นจึงไปเลือกกำหนดค่า I_{CB} หรือ AT ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยเราจะให้กระแสโหลดมีค่าเพียง 80% ของ AT เพราะถ้ากระแสโหลดเท่ากับ AT พอดี ตัว CB ก็จะมีผลดวงจรวด

ค่า AT ของ CB วงจรย่อยที่มีอยู่ตามท้องตลาดหาซื้อได้ทั่วไปจะเริ่มตั้งแต่ 16, 20, 32 และ 43-125AT ถ้าเป็น CB ขนาดใหญ่ขึ้นมากจะเป็นตัว Molded Case Circuit Breaker (MCCB) ก็จะมี

ค่าเรื่อยๆขึ้นไปจนถึงค่า 1600AT สำหรับ CB ตัวที่ใหญ่ขึ้นจะเรียกว่า Air Circuit Breaker (ACB) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 800-6300AT

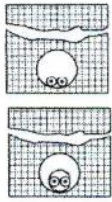
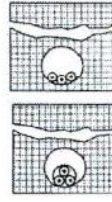
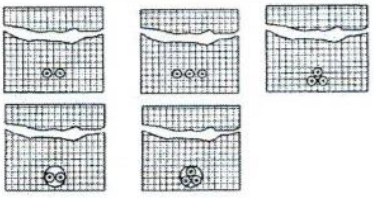
สำหรับการเลือกขนาดสายไฟฟ้าให้พิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่สายไฟฟ้ารับได้ I_{wire} โดย กระแสนี้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ AT ของ CB ทั้งนี้เพื่อให้สายไฟฟ้าปลอดภัยโดยมี CB ป้องกันไว้นั่นเอง ค่ากระแสไฟฟ้าที่สายไฟฟ้ารับได้ I_{wire} มีมาตรฐาน วสท. กำหนดไว้ดังตาราง ต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 กระแสไฟฟ้าของสายไฟฟ้า IEC01 รับได้ [1]

ลักษณะการติดตั้ง	กลุ่มที่ 1				กลุ่มที่ 2			
จำนวนตัวนำกระแส	2		3		2		3	
ลักษณะตัวนำกระแส	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน
รูปแบบการติดตั้ง								
รหัสชนิดเคเบิลที่ใช้ใช้งาน	60227 IEC 01, 60227 IEC 02, 60227 IEC 05, 60227 IEC 06, 60227 IEC 10, NYY, NYY-G, VCT, VCT-G, IEC 60502-1 และสายที่มีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สายทนไฟ, สายไร้ฮาโลเจน, สายควม้น้อย เป็นต้น							
ขนาดสาย(ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมป์)							
1	10	10	9	9	12	11	10	10
1.5	13	12	12	11	15	14	13	13
2.5	17	16	16	15	21	20	18	17
4	23	22	21	20	28	26	24	23
6	30	28	27	25	36	33	31	30
10	40	37	37	34	50	45	44	40
16	53	50	49	45	66	60	59	54
25	70	65	64	59	88	78	77	70
35	86	80	77	72	109	97	96	86
50	104	96	94	86	131	116	117	103
70	131	121	118	109	167	146	149	130
95	158	145	143	131	202	175	180	156
120	183	167	164	150	234	202	208	179
150	209	191	188	171	261	224	228	196
185	238	216	213	194	297	256	258	222
240	279	253	249	227	348	299	301	258
300	319	291	285	259	398	343	343	295
400	-	-	-	-	475	-	406	-
500	-	-	-	-	545	-	464	-

จากตารางที่ 7.1 เป็นตารางค่ากระแสไฟฟ้าของแต่ละขนาดสายไฟฟ้า ในตารางนี้แนะนำให้ใช้เฉพาะสาย IEC01 หรือ สายตารางที่ 4 (มาตรฐานเดิม) หรือสาย THW (ชื่อสายไฟฟ้าเดิม) การติดตั้งสายชนิดนี้จะติดตั้งได้ในท่อร้อยสายไฟฟ้า หรือช่องเดินสายเท่านั้น เพราะสายไฟฟ้ามีฉนวนบาง ห้ามติดตั้งนอกอาคาร หรือในที่ที่มีความชื้นเข้าได้

ตารางที่ 7.2 กระแสไฟฟ้าของสายไฟฟ้า CV หรือ IEC60502-1 รับผิดชอบ [1]

ลักษณะการติดตั้ง	กลุ่มที่ 5		กลุ่มที่ 6
จำนวนตัวนำกระแส	2	3	ไม่เกิน 3
ลักษณะตัวนำ	แกนเดี่ยว / หลายแกน	แกนเดี่ยว / หลายแกน	แกนเดี่ยว / หลายแกน
รูปแบบการติดตั้ง			
รหัสชนิดเคเบิลที่ใช้	IEC 60502-1		
ขนาดสาย (ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมแปร์)		
1.5	25	22	33
2.5	33	29	43
4	43	38	55
6	54	47	70
10	71	63	92
16	94	83	119
25	124	109	152
35	150	132	184
50	180	159	217
70	223	196	266
95	271	238	318
120	313	275	362
150	355	312	406
185	406	356	459
240	477	418	533
300	543	475	601
400	625	545	684
500	717	623	777

จากตารางที่ 7.2 เป็นการติดตั้งสายไฟฟ้าได้ดินแบบร้อยท่อ และฝังดินโดยตรงของสายไฟฟ้าชนิด CV หรือ IEC60502-1 นอกจากนี้สายไฟฟ้าชนิด NYY ก็สามารถติดตั้งลักษณะนี้ได้เช่นกัน แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่สายไฟรับได้จะมีค่าต่ำกว่านี้เล็กน้อย

สำหรับผู้รับงานเขียนแบบไฟฟ้าอย่างเช่นช่างเขียนแบบอาคาร หรือสถาปนิก เราต้องสนใจการเขียนตารางโหลด และไดอะแกรมเส้นเดียวของตู้ MDB ด้วย ซึ่งขั้นตอนแรกเราต้องเขียนตารางโหลดต่อจากตำแหน่งดวงโคม และเต้ารับไฟฟ้าที่เราเขียนไปแล้ว หรือผู้ที่ปฏิบัติงานทั่วไปก็ต้องพิจารณารูปแบบทางไฟฟ้าด้วย

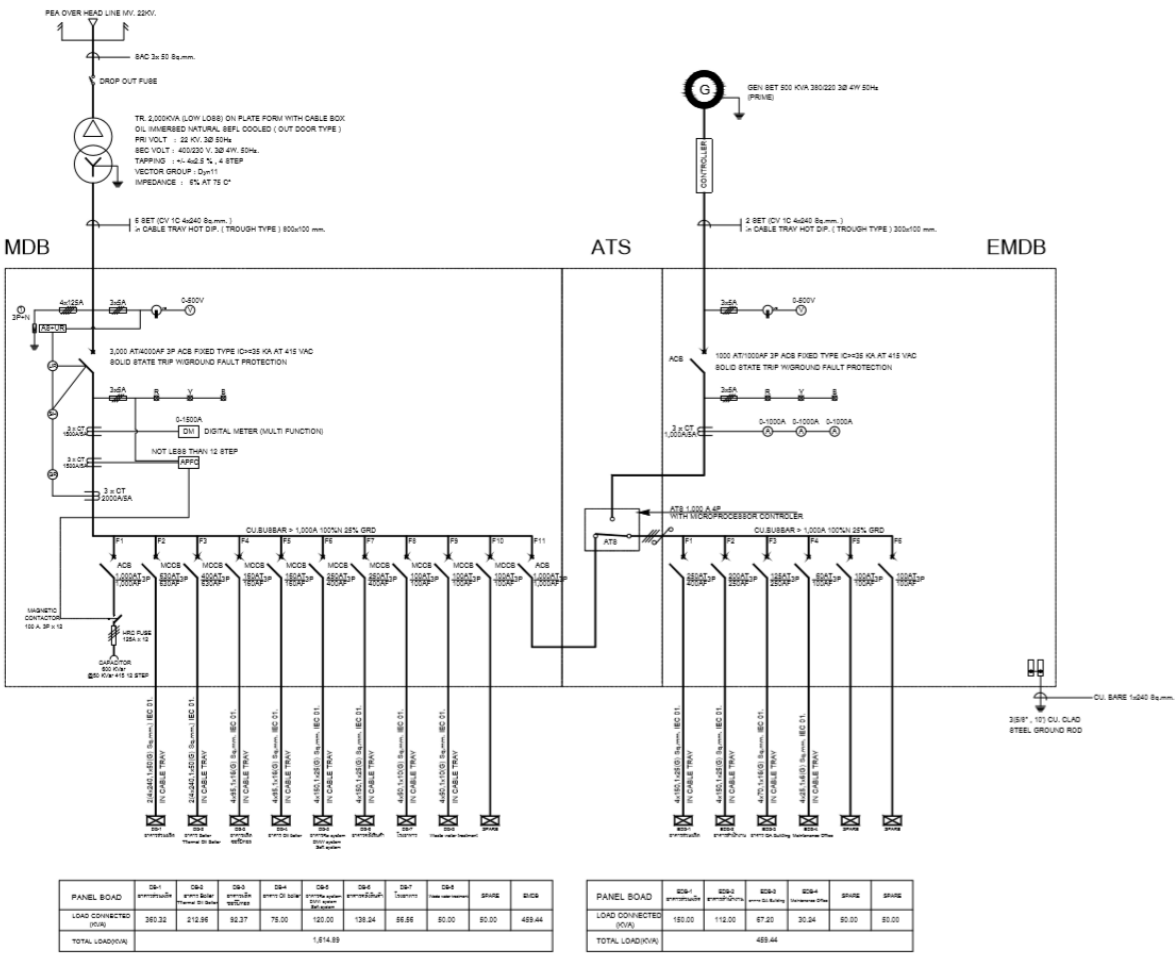
LC										
LOCATION :						PANEL No :				
CAPACITY : 42						FROM : MDB				
No.	DISCRIPTION	LOAD (VA)			CB		CABEL		RACKWAY	
		A	B	C	AT	POLE	TYPE	SQ.MM.		
1										
3										
5										
7										
9										
11										
20										
22										
24										
TOTAL		0	0	0	Main CBAT/.....AF, 3P IC KA at 400 V.					
GRAND TOTAL (VA)		0			IEC 60502-1Sq.mm.					
GRAND TOTAL (A)		0.00			 sq.mm. G					

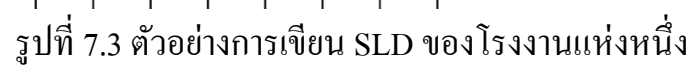
รูปที่ 7.2 ตารางโหลดทางไฟฟ้าของผู้โหลดเซ็นเตอร์ (LC) และลักษณะของผู้ LC

จากรูปที่ 7.2 เป็นลักษณะการเขียนตารางโหลดรูปแบบหนึ่ง คนออกแบบระบบไฟฟ้าอาจเขียนแตกต่างกันไป แต่สิ่งที่จะเหมือนกันคือในช่องลำดับด้านซ้ายมือสุด จะเห็นเป็นเลขที่เรียงกัน อันนี้หมายถึงวงจรไฟฟ้าลำดับที่ จะเป็นตามรูปแบบตู้โหลดเซ็นเตอร์ กล่าวคือ ลำดับเลขที่จะอยู่ด้านซ้ายมือของผู้ ส่วนเลขที่จะอยู่ด้านขวามือของผู้

ตัวอย่างการคำนวณโหลดสำหรับวงจรที่ 1 สามารถทำได้ง่ายๆคือ นำแรงดัน 220V คูณกับกระแสไฟฟ้าของโหลด แล้วนำไปลงในช่องโหลด A การที่ ในช่องสี่เหลี่ยมด้านล่างของตารางโหลด เป็นโหลดรวมของแต่ละวงจร สามารถนำไปหาค่า AT ของเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตามหลักการเดิมในรูปที่ 7.1

นอกจากนี้เมื่อเราเขียนตารางโหลดของผู้โหลดเซ็นเตอร์หลายๆตู้แล้ว โหลดรวมจากหลายตู้นั้นก็จะเป็นโหลดรวมของผู้ MDB เราจะต้องเขียนไดอะแกรมเส้นเดียว ลักษณะของไดอะแกรมเส้นเดียวอาจเป็นดังรูป





ในรูปที่ 7.3 รูปแรกนั้นเป็นภาพรวมตัวอย่างการเขียนแบบ SLD รูปหนึ่งที่เล็กมาก ดังนั้นในภาพต่อๆมาเราจึงขยายขึ้นเพื่อให้ดูชัดเจนยิ่งขึ้น การเขียนสัญลักษณ์เซอร์กิตเบรเกอร์ ดังในรูปนี้เป็นการเขียนตามมาตรฐาน IEC ที่ใช้กันทั่วโลก การที่จะได้วงจร SLD นี้มา วิศวกรไฟฟ้าจะเป็นผู้ออกแบบ ต่อจากนั้นจึงนำมาเขียนเป็นวงจรเพื่อการก่อสร้างและติดตั้งต่อไป

7.3 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอการเลือกใช้สายไฟฟ้าและขนาดของเซอร์กิตเบรเกอร์เป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการเขียนแบบและออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคาร ซึ่งระบบไฟฟ้าในอาคาร ตั้งแต่ขนาด 200-250kVA ขึ้นไปถือว่าเป็นงานวิชาชีพควบคุมในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นในการออกแบบและติดตั้งจะต้องมีผู้รับผิดชอบที่เป็นวิศวกรไฟฟ้าเป็นผู้ควบคุม แต่การเขียนแบบตามการออกแบบนั้นใครจะเป็นผู้เขียนก็ได้ ซึ่งผู้เขียนแบบควรมีความรู้ในด้านนี้ด้วย เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า “มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย” สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท) 2556

ภาคผนวก

การใช้โซลาร์เซลล์เพื่อการลดค่าพลังงานไฟฟ้าในอาคาร



การออกแบบและติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ เพื่อลดค่าไฟฟ้า สำหรับช่างไฟฟ้าและบุคคลทั่วไป



บรรยายโดย
รศ.ดร.กานต์ เกิดชื่น

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มทร.อีสาน

สามัญวิศวกรไฟฟ้า

โทร&ไลน์ 081-7003242

17-18 พฤษภาคม 2568

ให้กับพนักงานและผู้จะปฏิบัติงานร่วมกับ บริษัท JKR จำกัด และผู้สนใจ ณ มทร อีสาน นครราชสีมา

RMUTI

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มทร.อีสาน นครราชสีมา

IAPER



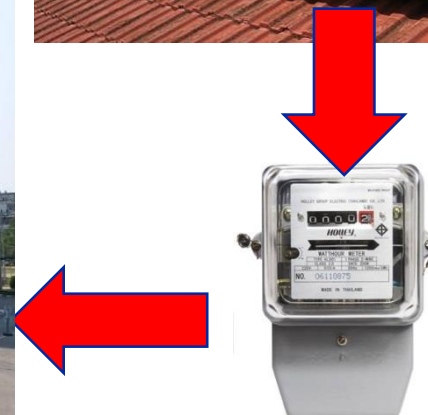
จุดประสงค์การบริการวิชาการ

- ☐ เพื่อส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานหมุนเวียนในสังคม
- ☐ เพื่อส่งเสริมให้ผู้ให้บริการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์มีความเข้าใจ
เพิ่มเติมมากขึ้น
- ☐ เพื่อให้ผู้ต้องการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์เข้าใจระบบและการ
ปฏิบัติการติดตั้งระบบ



บทนำ

PEA



kWp ???

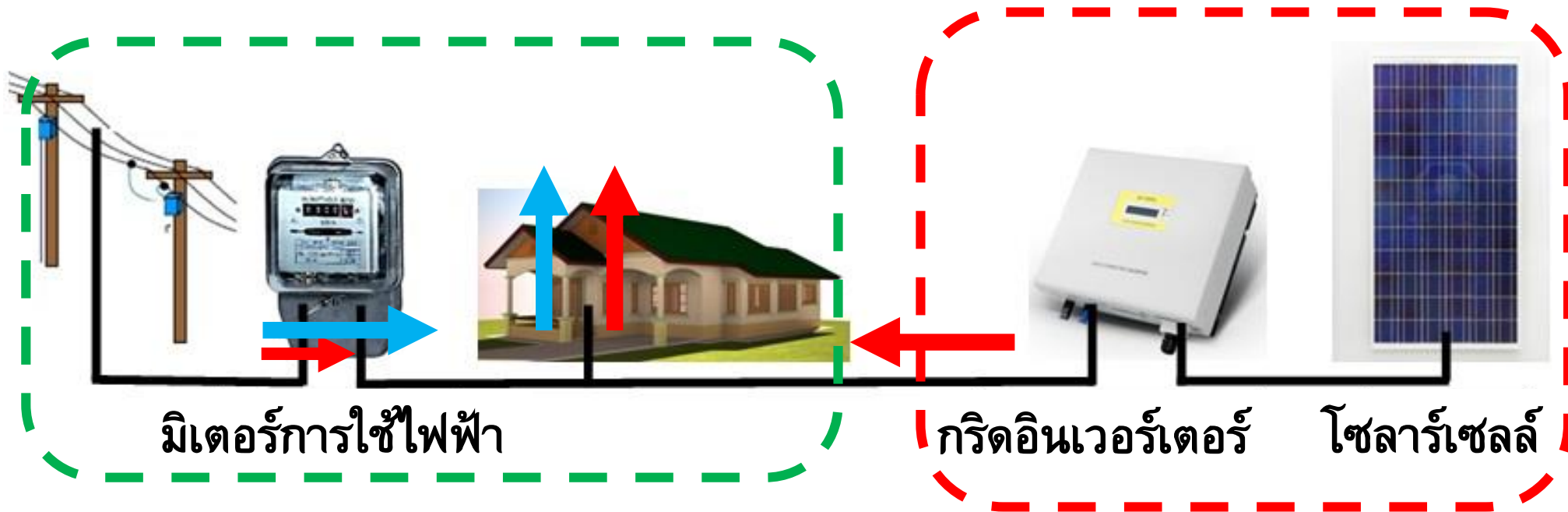
RMUTI

IPER



การออกแบบระบบโซลาร์เซลล์เชื่อมต่อสายส่ง

❖ ภาพรวมของระบบ





ปริมาณและการใช้พลังงานไฟฟ้า

Version 2.1.1.0

AMA Automatic Meter Reading

วิดิโอสอนการใช้งานและการตั้งค่า

ปฏิทินวัน Off-Peak

กรณณาเข้าสู่ระบบ ::

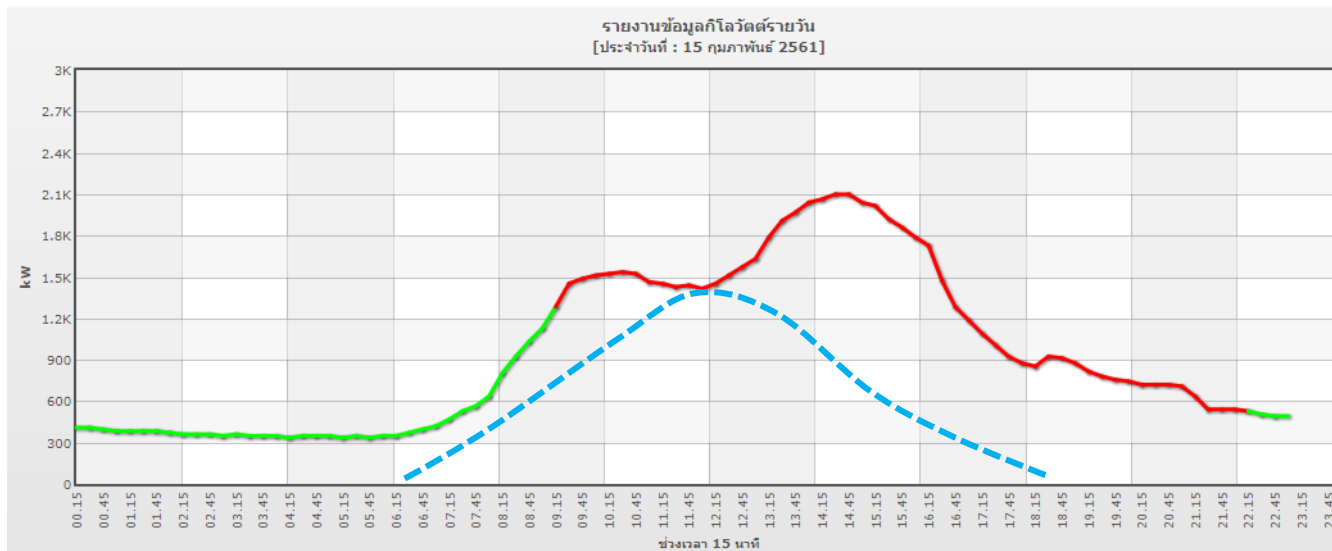
0601101974097400

.....

Login

☐ kWp ???

☐ ไม่มีการใช้ไฟกลางวัน ???



RMUTI

Kaan Kerdchuen

IAPER



ปริมาณและการใช้พลังงานไฟฟ้า



RMUTI

Kaan Kerdchuen

6

IAPER

Intelligent Power and Energy Research

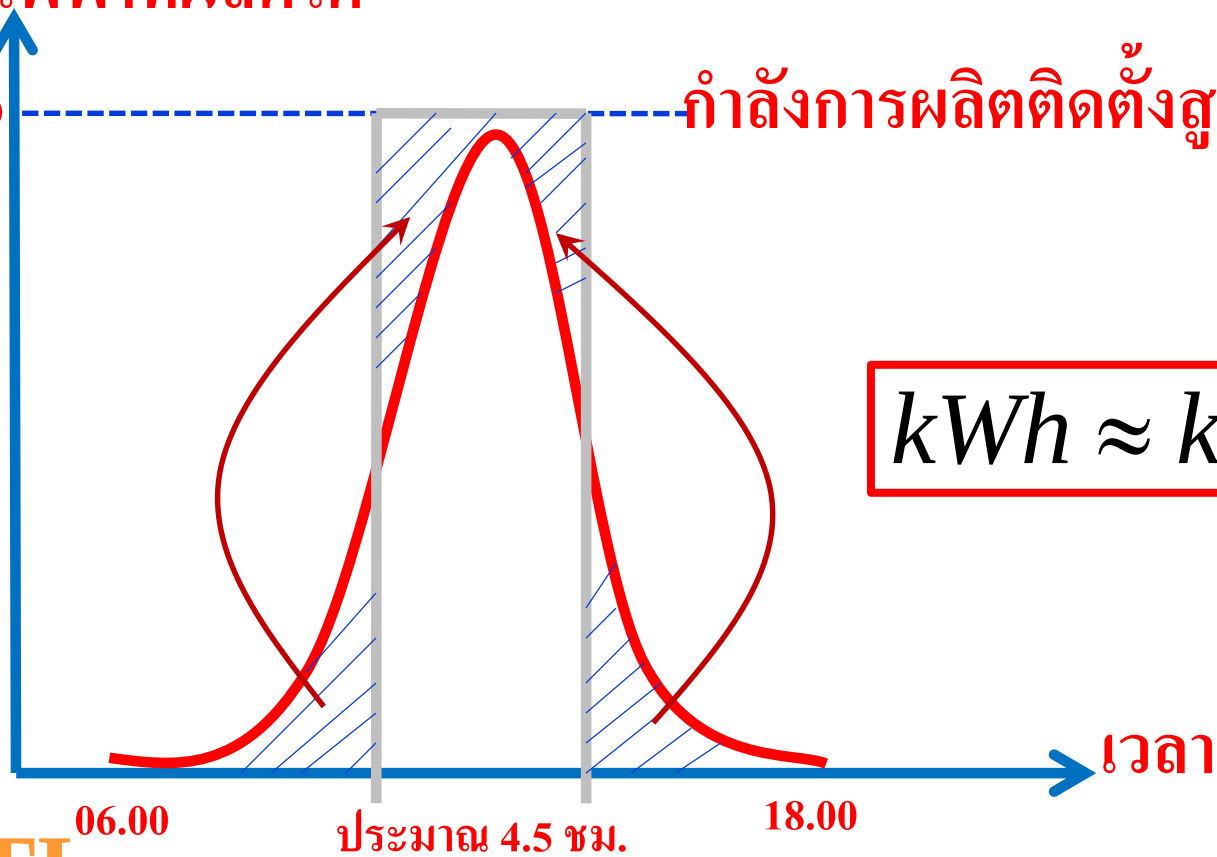


พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

kWp

กำลังการผลิตติดตั้งสูงสุด



$$kWh \approx kW \times 4.5h$$



ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้

- ค่าไฟฟ้าบ้านเราประมาณ 4.7 บาท/หน่วย
- ดังนั้นค่าไฟฟ้าที่จะลดได้ประมาณ

Energy Cost Reduction per Month

$$\approx kW \times 4.5h \times 4.7\text{Baht} \times 30\text{Day}$$

$$\approx 10kW \times 4.5h \times 4.7\text{Baht} \times 30\text{Day} = 6,345 \text{ Baht}$$

- สามารถนำไปประมาณการคืนทุนได้



การลงทุนโครงการโดยประมาณ

ขนาด (kW)	พื้นที่หลังคา (แผง/ตร.ม.)	ผลิตไฟฟ้าได้ต่อเดือนประมาณ (หน่วย, kWh)	ลดค่าไฟฟ้าต่อเดือน ได้ประมาณ (บาท)	งบประมาณรวมค่าติดตั้ง (บาท)	ระยะเวลาคืนทุน ประมาณ (ปี)
1.6	4/8	243	972	70,000	5-6
3	7/14	425	1,700	100,000	4-5
5	12/24	729	2,916	150,000	4-5
10	22/44	1,336	5,346	260,000	3-4
100	222/444	13,486	53,946	2,300,000	3-4
1,000	2,222/4,444	134,986	539,946	21,000,000	3-4

เป็นราคาสำหรับผู้รับจ้างและเจ้าของงานอยู่ได้ ถือว่าเหมาะสม ณ ปีนี้

RMUTI

IAPER



ลำดับขั้นตอนการดำเนินการ การออกแบบ และติดตั้ง (ของช่าง)

- ☐ ขอบทราบปริมาณ และลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้สนใจ
- ☐ ขอบทราบปริมาณพื้นที่หลังคา และ GPS Location
- ☐ ออกแบบระบบโซลาร์เซลล์ชนิดเชื่อมต่อสายส่ง
(Grid connected)
- ☐ ติดตั้งระบบ
- ☐ การดำเนินการด้านเอกสาร เพื่อการอนุญาตจากหน่วยงาน
ราชการ



พื้นที่หลังคาและลักษณะหลังคา

- ☐ เพื่อหาความสามารถในการติดตั้งแผง PV
- ☐ รูปแบบการยึดแผง
- ☐ 1 ตร.วา = 4 ตร.ม.
- ☐ 2 ตร.ม. ได้ 400Wp

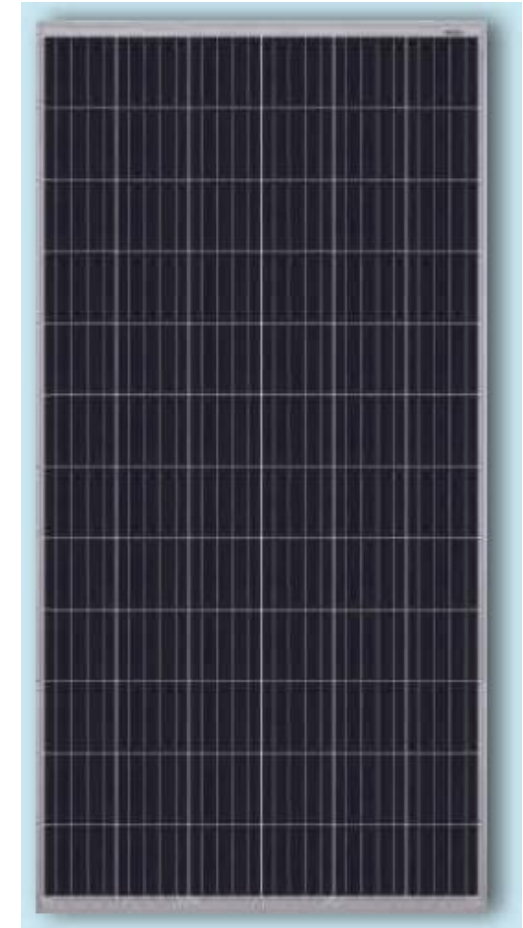




การออกแบบระบบโซลาร์เซลล์เชื่อมต่อสายส่ง

- ❖ จำนวนแผงตามความต้องการ
- ❖ แรงดันไปกำหนดจำนวนแผงที่อนุกรมกัน
- ❖ กระแสไฟฟ้าไปกำหนดขนาดสายไฟ

TYPE	JAP6-72-305/4BB
Rated Maximum Power at STC (W)	305
Open Circuit Voltage (Voc/V)	45.37
Maximum Power Voltage (Vmp/V)	36.88
Short Circuit Current (Isc/A)	8.81
Maximum Power Current (Imp/A)	8.27
Module Efficiency [%]	15.73





การออกแบบระบบโซลาร์เซลล์เชื่อมต่อสายส่ง

- ❖ ขนาดอินเวอร์เตอร์ตามต้องการ
- ❖ แรงดันด้านอินพุต DC
- ❖ MPPT



Input

Max. Input Voltage ¹	1,100 V
Max. Current per MPPT	22 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	30 A
Start Voltage	200 V
MPPT Operating Voltage Range ²	200 V ~ 1,000 V
Rated Input Voltage	600 V @380 Vac / 400 Vac; 720 V @480 Vac
Number of MPP trackers	6
Max. number of inputs	12

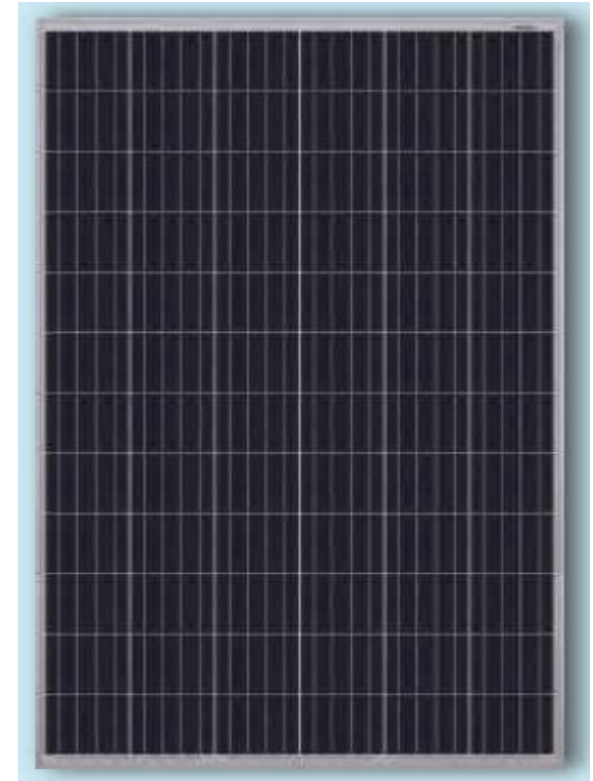
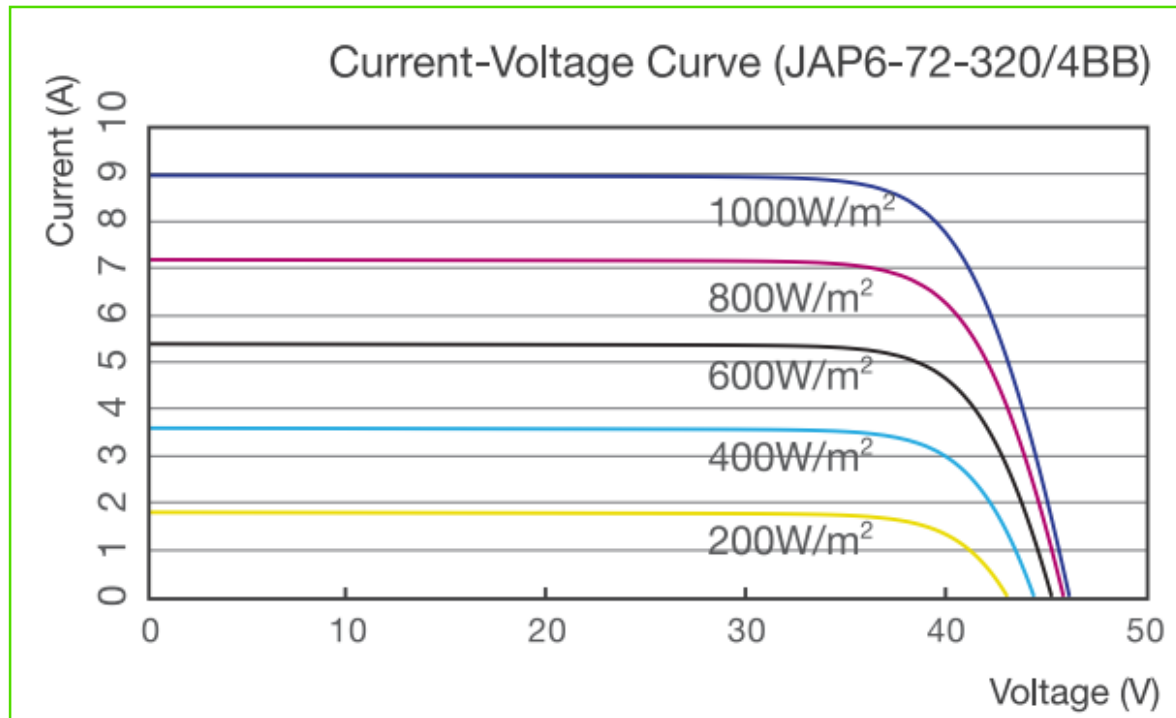
Output

Rated AC Active Power	60,000 W
Max. AC Apparent Power	66,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	66,000 W
Rated Output Voltage	220 V / 380 V, 230 V / 400 V, default 3W + N + PE; 3W + PE optional in settings; 277 V / 480 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz



อุปกรณ์ป้องกันในระบบ PV

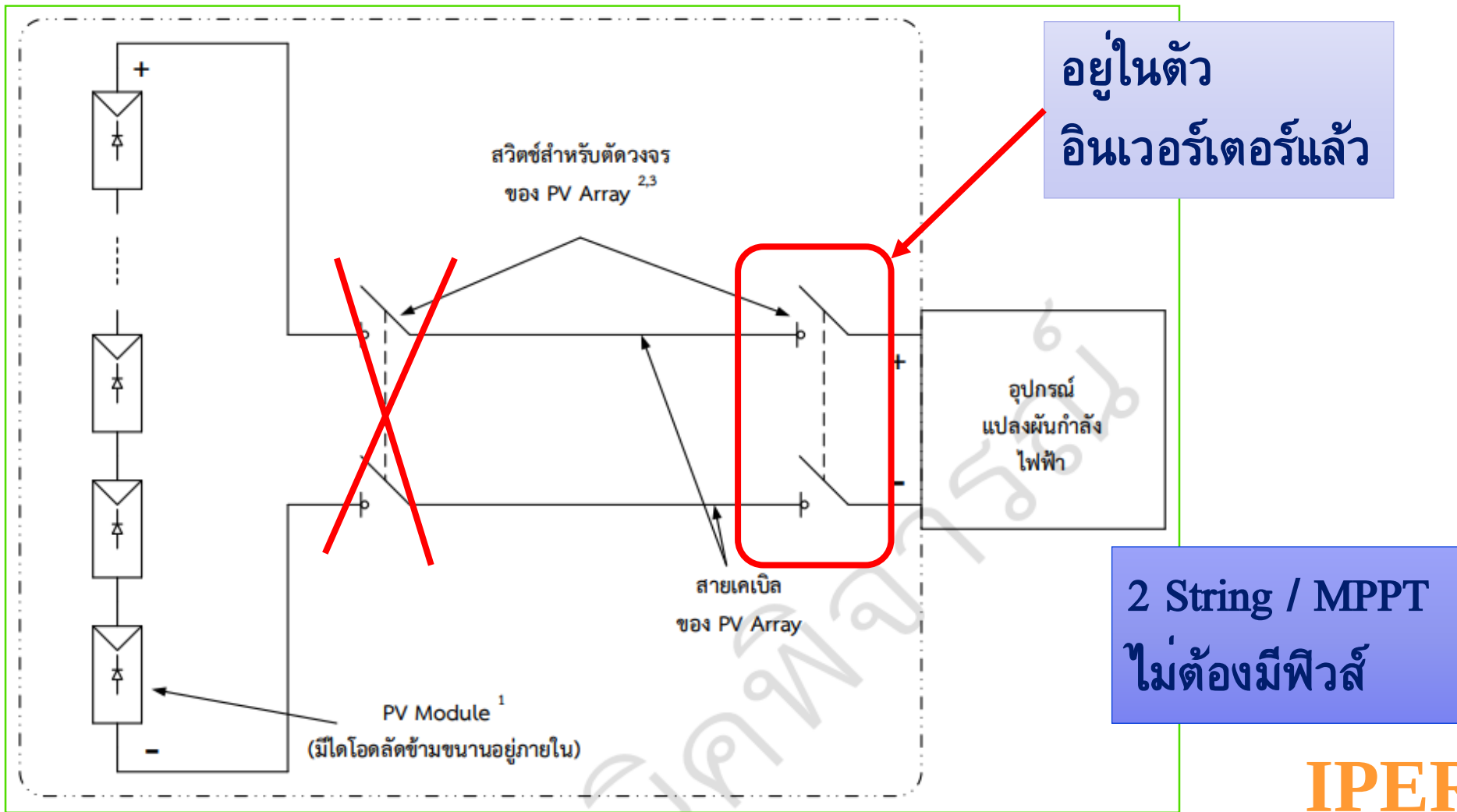
- ❖ AC เหมือนระบบไฟฟ้าที่เราคุ้นเคย
- ❖ DC ???



- ❖ กระแสลัดวงจรไม่เกิน 9A
- ❖ อุปกรณ์ป้องกัน?

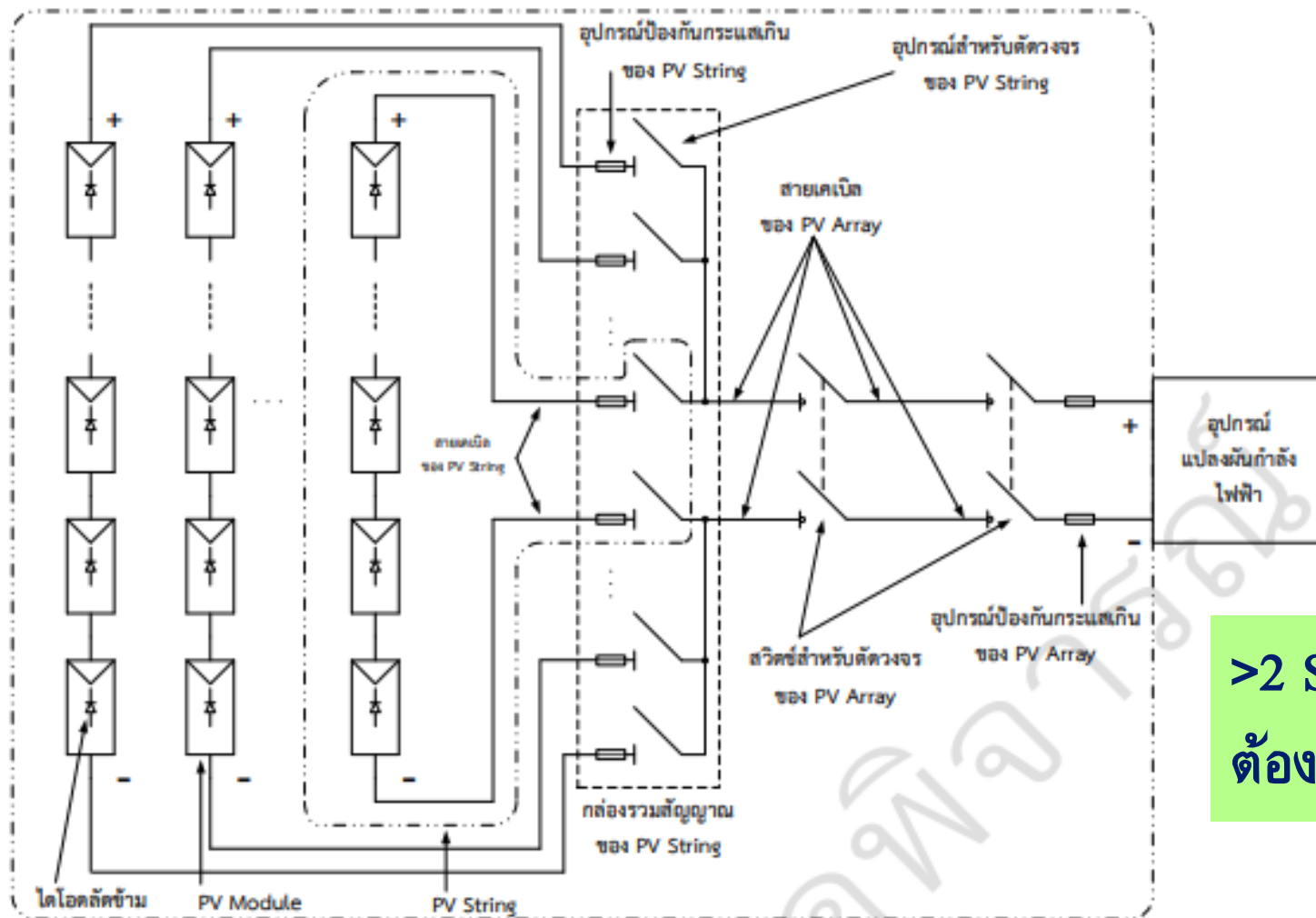


อุปกรณ์ป้องกันในระบบ PV





อุปกรณ์ป้องกันในระบบ PV

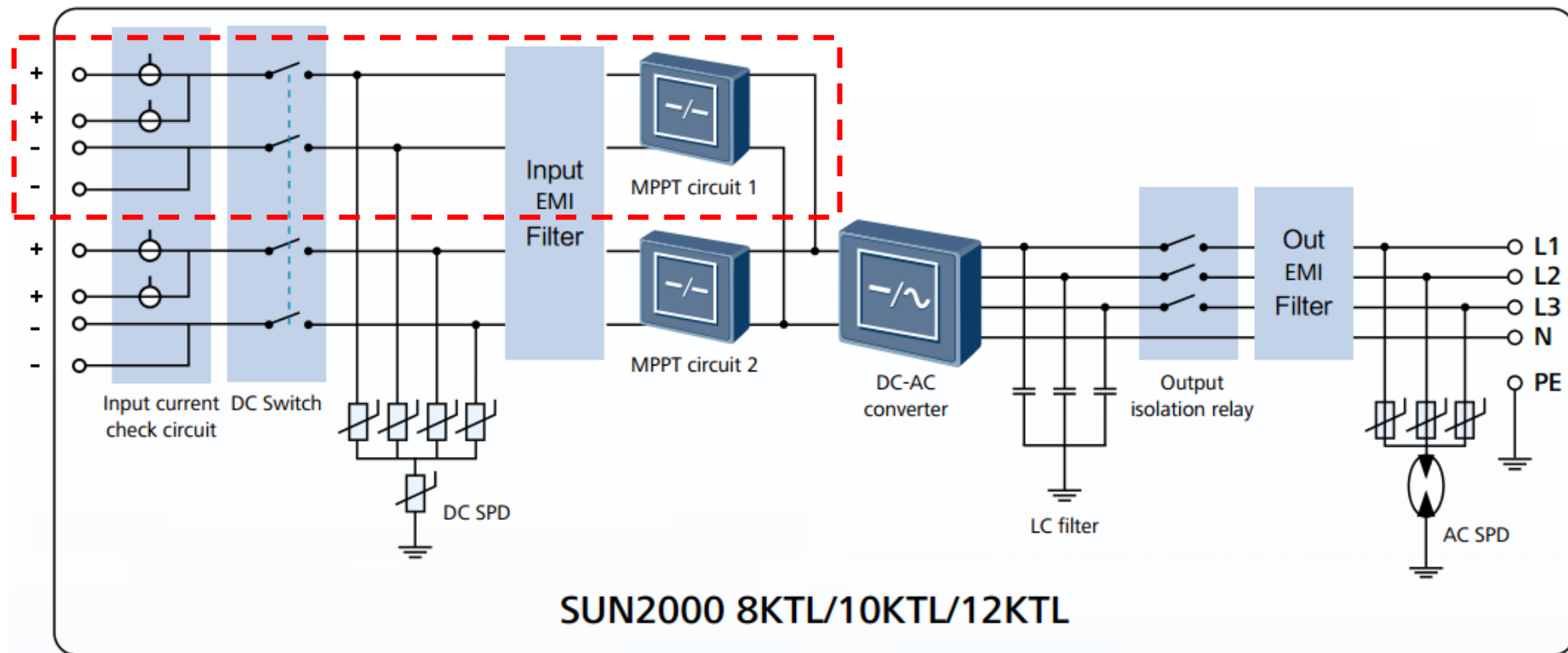


>2 String / MPPT
ต้องมีฟิวส์

IAPER



อุปกรณ์ป้องกันในระบบ PV

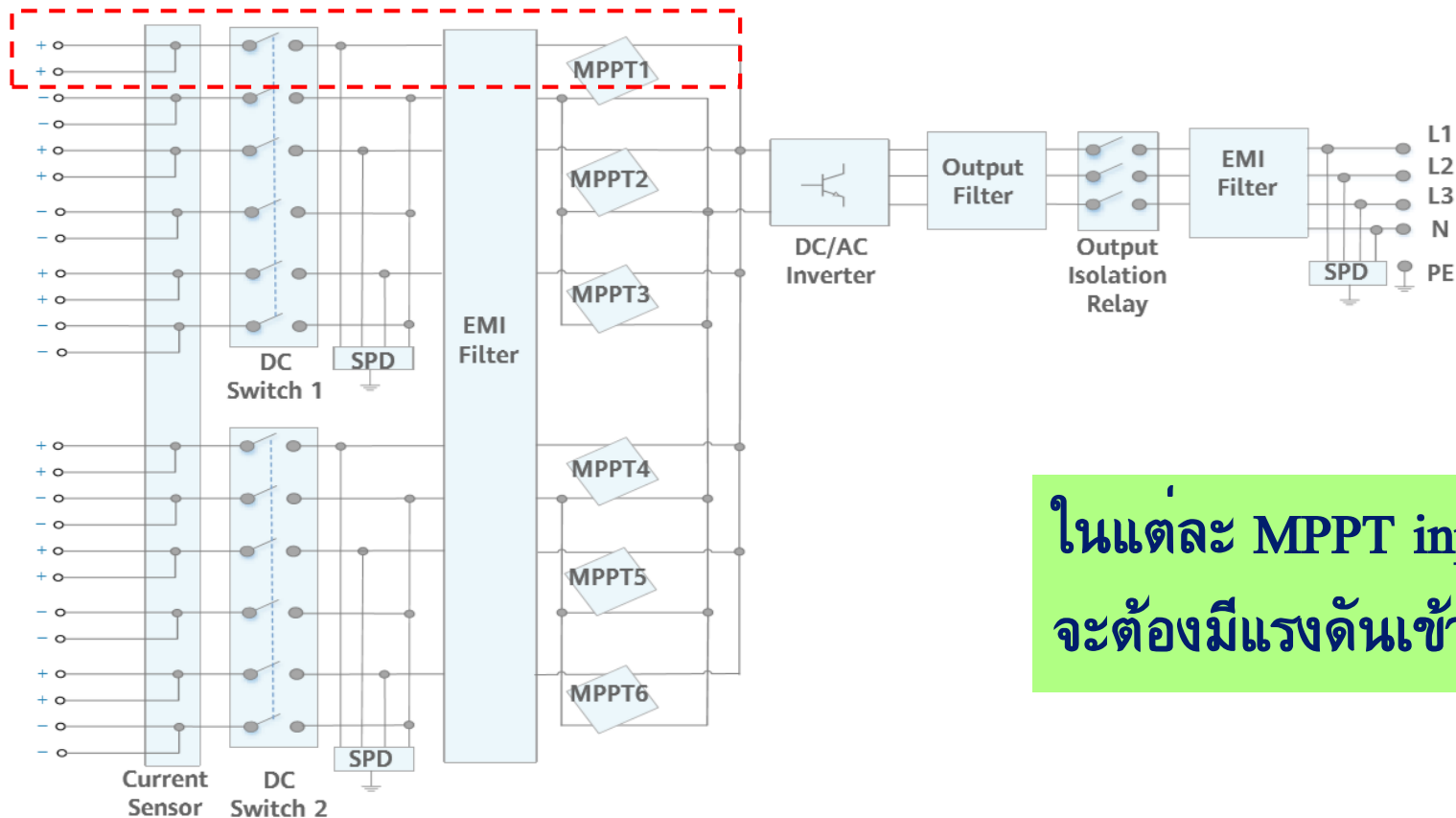


ฟิวส์ และ SPD มีมาครบในหลายๆยี่ห้อ ต่อสาย DC AC ก็ใช้ได้



MPPT และการต่อวงจร

Circuit Diagram



SUN2000-60KTL-M0

ในแต่ละ MPPT input
จะต้องมีแรงดันเข้าเท่ากัน



การดำเนินการด้านเอกสาร

- สำนักงานท้องถิ่น อบต. หรือ เทศบาล
 - แบบหลังคา + วิศว.โยธารับรองความแข็งแรง
 - เอกสารเจ้าของอาคาร
 - สำเนาการรับแจ้งเพื่อทราบ หรือได้ อ.1. (กรณีเกิน 160 ตร.ม.) เพื่อนำส่ง กกพ.
- กกพ. เขต (ยื่นออนไลน์ <https://cleanenergyforlife.net/login>)
 - Single Line Diagram และวิศวกรไฟฟ้ารับรองออกแบบและการติดตั้ง
 - สเปคแผง อินเวอร์เตอร์ และรูปภาพการติดตั้ง 80%
 - ใบมอบอำนาจตามแบบฟอร์ม กกพ + สำเนาการรับแจ้งเพื่อทราบ หรือใบ อ.1
 - เอกสารเจ้าของอาคาร
- กฟภ. (แผนกพลังงานทดแทน ตั้งอยู่การไฟฟ้าเขต ปัจจุบันออนไลน์ <https://ppim.pea.co.th/project/solar/detail/62885d055bdc7f264c5edcdd>)
 - Single Line Diagram และวิศวกรไฟฟ้ารับรองแบบและการติดตั้ง
 - สเปคแผง และอินเวอร์เตอร์
 - เอกสารเจ้าของอาคาร + บิลค่าไฟ
 - มอบอำนาจตามแบบฟอร์มการไฟฟ้า



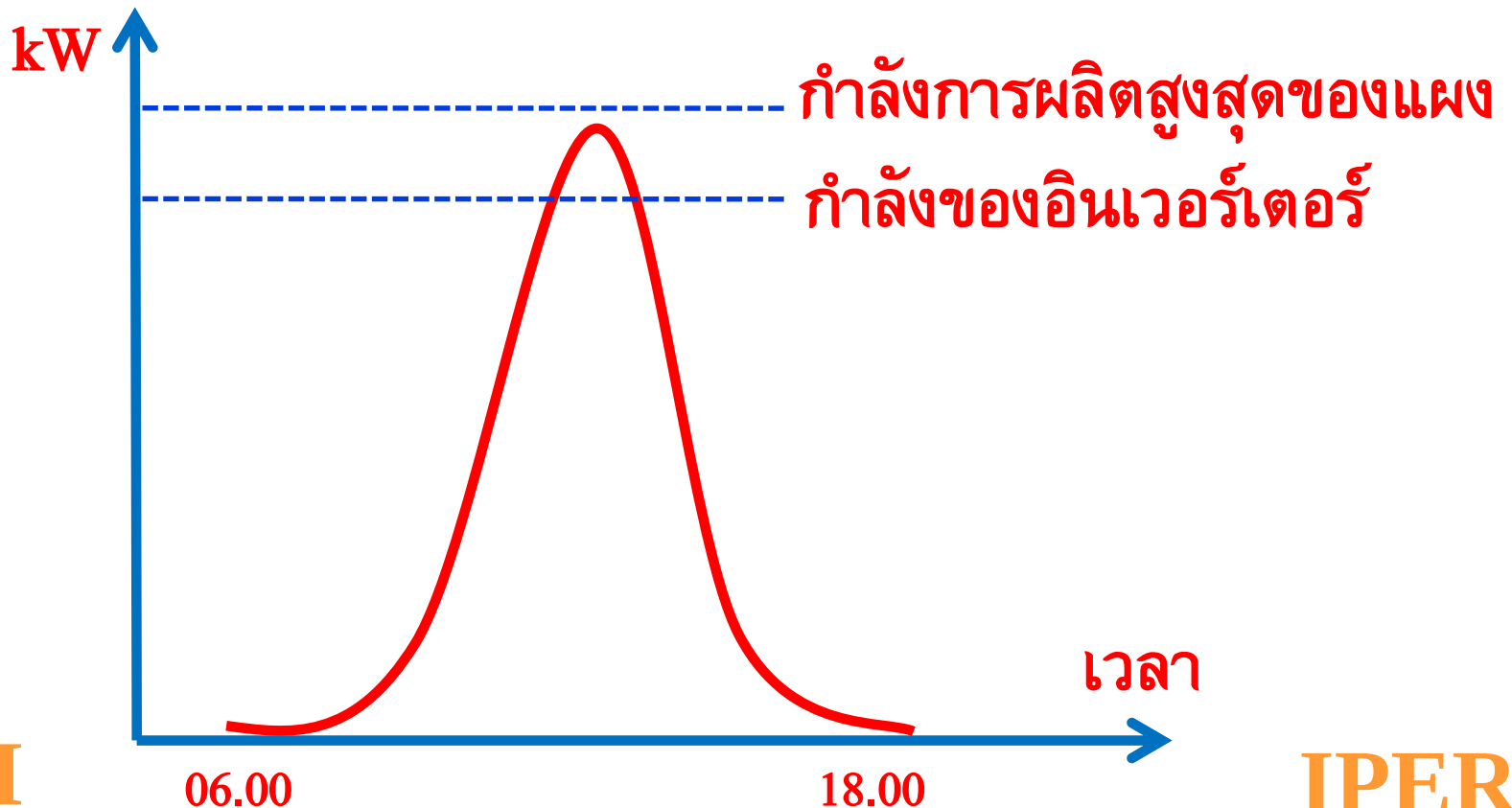
เว็บไซต์ที่เกี่ยวข้อง

- ☐ กกพ. ยื่นเอกสารออนไลน์ที่: <https://cleanenergyforlife.net/login>
- ☐ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ยื่นออนไลน์เพื่อขายไฟ:
<https://ppim.pea.co.th/project/solar/detail/62885d055bdc7f264c5edcdd>
- ☐ PEA inverter list (ค้นหาที่ google) <https://smartlist.pea.co.th/>
- ☐ MEA inverter list (ค้นหาที่ google)
- ☐ <http://www.rmuti.ac.th/user/kaan.ke/solarcellbook.pdf>



อื่นๆ

- ❖ กำลังของแผงมากกว่ากำลังอินเวอร์เตอร์ได้ แต่กำลังการผลิตจะถูกตัด
- ❖ สนใจที่แรงดันต้องไม่เกินแรงดันที่อินเวอร์เตอร์รับได้





อื่นๆ

❖ อุปกรณ์ต่อสายที่ช่างไฟฟ้าทั่วไปยังไม่เคยเจอ คือ MC4

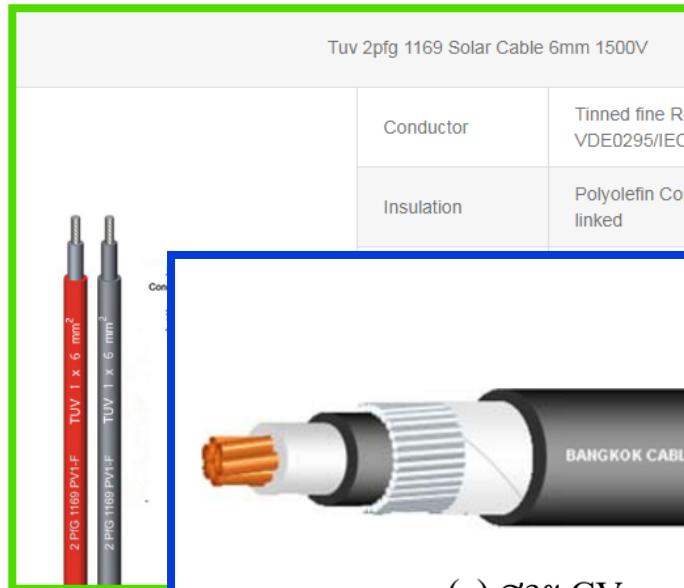




อื่นๆ

❖ อินเวอร์เตอร์มีการออกแบบแรงดัน DC 1500V แล้ว

ดังนั้น สาย แผง และอุปกรณ์ประกอบ ต้องออกแบบเหมาะกับ 1500Vdc ด้วย



$$600V \times 1.414 \times 2 = 1,696.8$$



(a) สาย CV



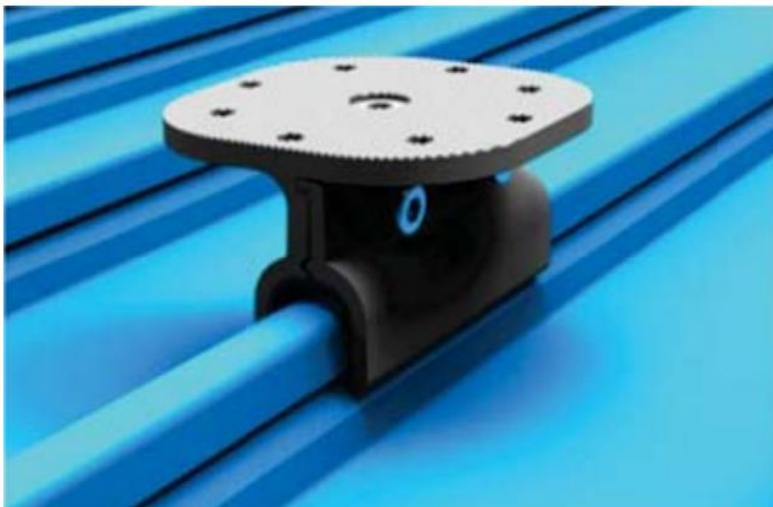
(b) สายโซลาร์เซลล์โดยเฉพาะ (PV1-F)

รูปที่ 4.4 สายไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหลังคา



อื่นๆ

❖ อุปกรณ์จับยึดแผงโซลาร์เซลล์



(a) แบบไม่ต้องเจาะเพราะหลังคาหนีบได้



(b) หลังคาที่ต้องเจาะ



อื่นๆ

❖ อุปกรณ์จับยึดแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 4.2 การติดตั้งบนหลังคาแบบกระเบื้องซีเมนต์

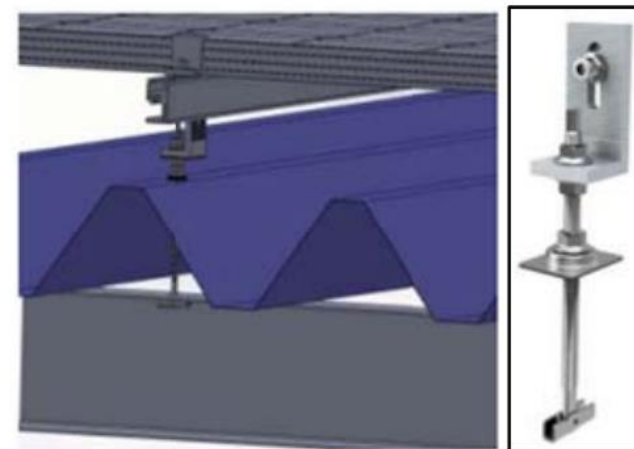


อื่นๆ

❖ อุปกรณ์จับยึดแผงโซลาร์เซลล์



(a) ติดตั้งบนแป้นไม้หรือเหล็กหนา



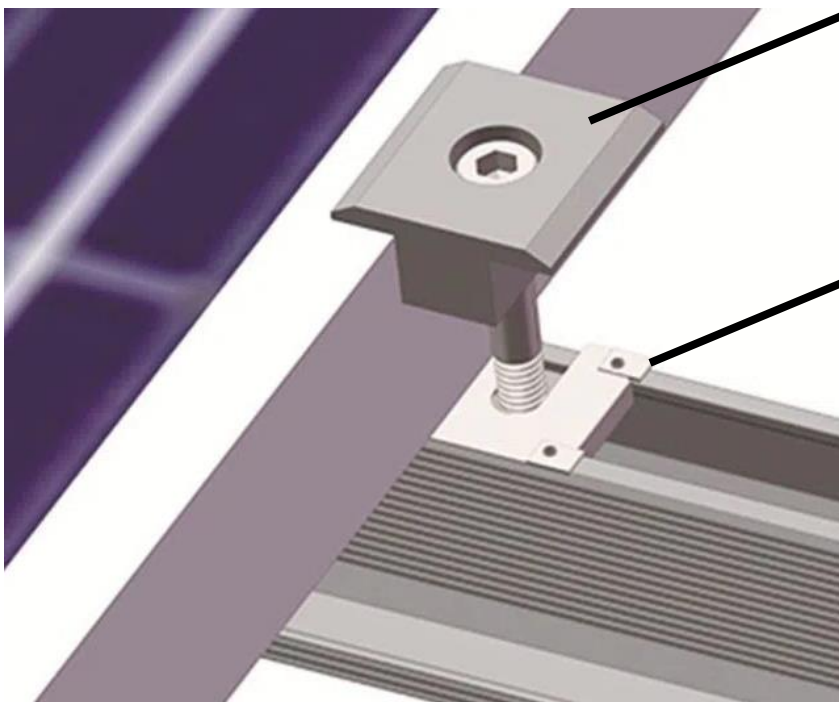
(b) ติดตั้งบนแป้นเหล็กบาง

รูปที่ 4.3 การติดตั้งบนกระเบื้องลอนคู่



อื่นๆ

❖ อุปกรณ์จับยึดแผงโซลาร์เซลล์



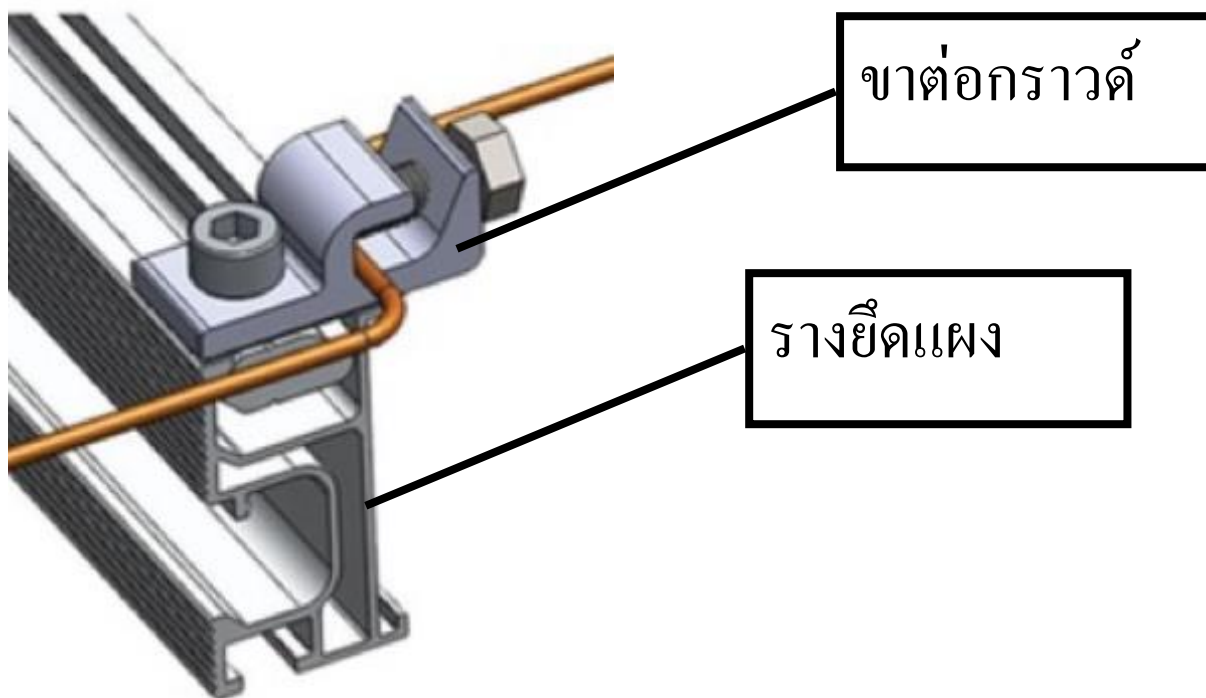
มิดแคลมป์

กราวด์เพลท



อื่นๆ

❖ อุปกรณ์จับยึดแผงโซลาร์เซลล์





อื่นๆ

❖ การติดตั้งฟิวส์หรืออุปกรณ์ด้าน DC ที่ไม่จำเป็น

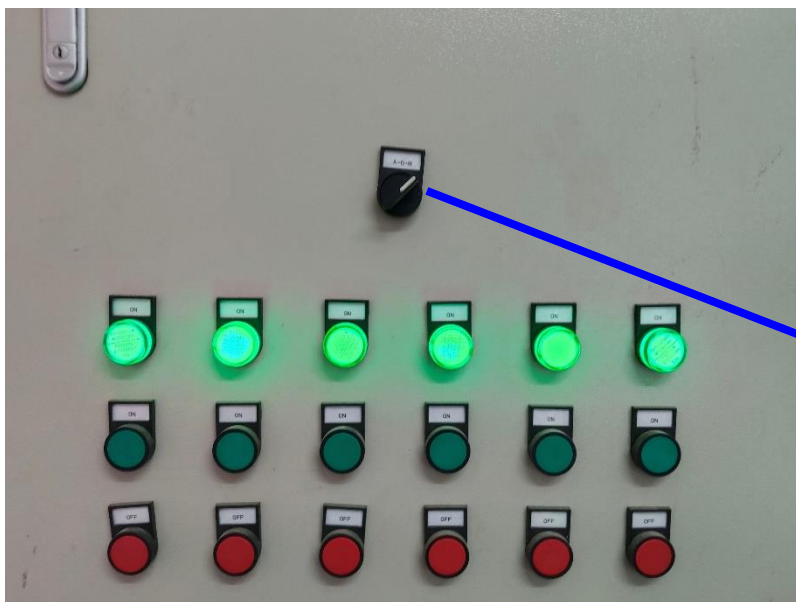


ฟิวส์ด้าน DC มีความร้อนสะสม ทำให้
ฟิวส์ขาด ซึ่งไม่ใช่ขาดจากการลัดวงจร



อื่นๆ

❖ ระบบการแก้ตัวประกอบกำลังอัตโนมัติ



เมื่อแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง ระบบการ
ปรับแก้ตัวประกอบกำลังก็จะตัดๆ ต่อกๆ

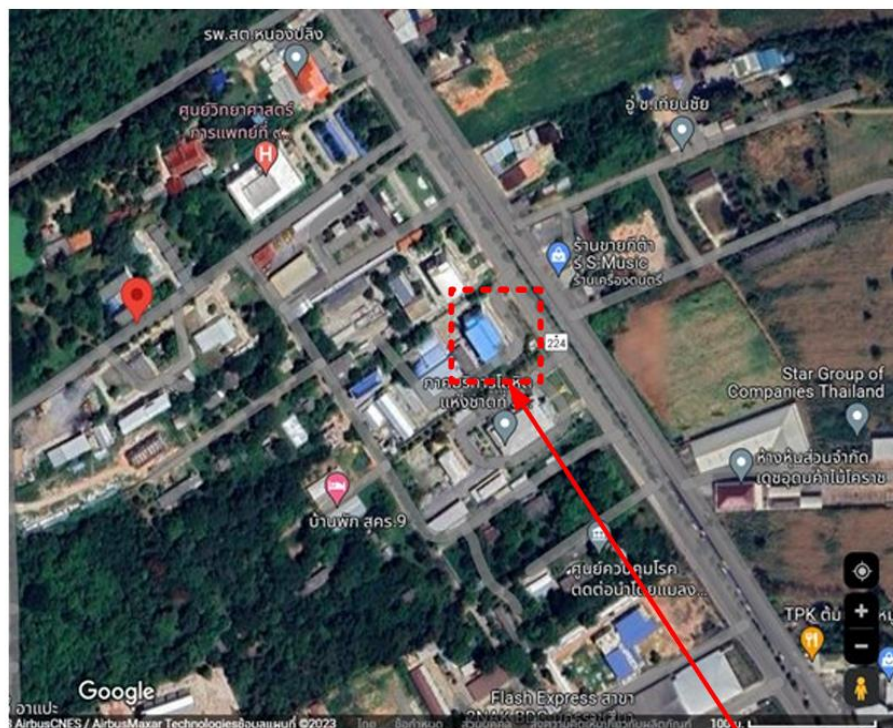
เลือกที่ M แล้วเปิดวงจรต่อตัวเก็บประจุ
ทั้งหมด หรือตามต้องการ



ตัวอย่างการดำเนินการออกแบบ

Solar PV Rooftop 20.91kWp ศูนย์สนับสนุนบริการสุขภาพที่ 9 เลขที่ 526 ถ. ราชสีมา-โชคชัย ต.หนองบัวศาลา อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา

GPS:14.911031, 102.151884



Building for Solar PV Rooftop Installation

RMUTI

Kaan Kerdchuen

31

Intelligent Power and Energy Research

IAPER



ตัวอย่างการดำเนินการออกแบบ

Solar PV Rooftop 20.91kWp ศูนย์สนับสนุนบริการสุขภาพที่ 9 เลขที่ 526 ถ. ราชสิมา-โชคชัย ต.หนองบัวศาลา อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา
GPS:14.911031, 102.151884



ระบบ Solar PV Rooftop ขนาด
34 x 615Wp Mono = 20.91kWp

แผงโซลาร์ Mono 615Wp
ขนาด 1.14 x 2.5 เมตร

วอลต์เวย์ หน้ากว้าง 30 ซม.

ท่อน้ำสำหรับการล้างแผง

ก๊อกน้ำสำหรับการล้างแผง

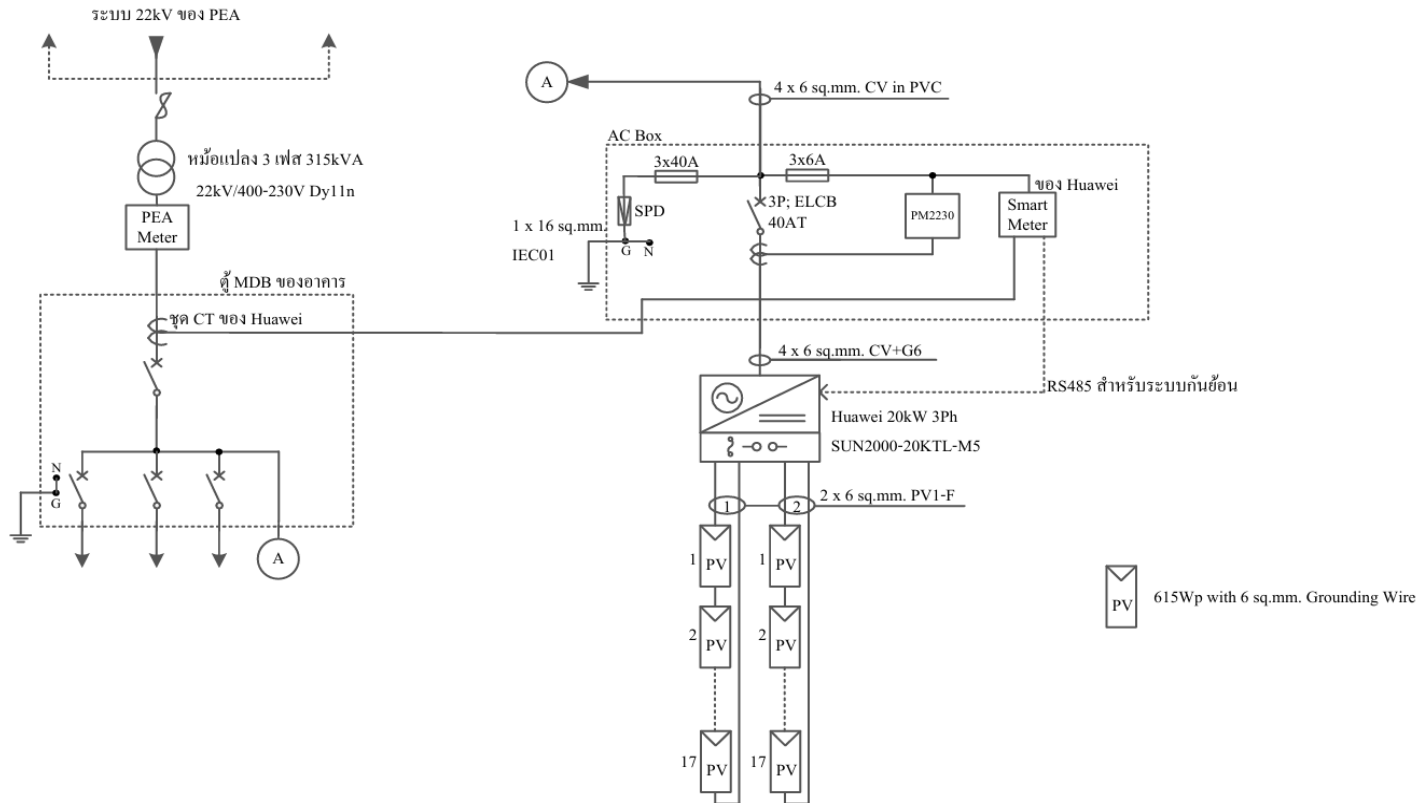
บันไดลง

Solar PV Modules Layout



ตัวอย่างการดำเนินการออกแบบ

Solar PV Rooftop 20.91kWp ศูนย์สนับสนุนบริการสุขภาพที่ 9 เลขที่ 526 ถ. ราชสีมา-โชคชัย ต.หนองบัวศาลา อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา
GPS:14.911031, 102.151884



Solar PV Rooftop Single Line Diagram



ถาม & ตอบ

RMUTI

IAPER



แบบทดสอบ

- ❖ ให้ออกแบบการจัดวางแผงระบบโซลาร์เซลล์ขนาดประมาณ 5kWp สำหรับการลดค่าพลังงานไฟฟ้า โดยพิจารณาที่หลังคาบ้านตัวเอง หรือเพื่อนบ้าน
- ❖ พร้อมเขียน SLD จากข้อมูลอินเวอร์เตอร์ และแผงโซลาร์เซลล์ ที่ส่งให้



ศึกษาผลการออกแบบระบบ PV ด้วย PVsyst

❖ ศึกษาดูผลการรันผลของโปรแกรม PVsyst

	GlobHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	EffArrR %	EffSysR %
January	157.5	23.42	186.0	180.9	779.2	765.6	14.05	13.80
February	154.8	25.23	173.3	168.9	718.6	706.1	13.91	13.67
March	181.0	26.42	190.0	185.1	778.5	764.8	13.74	13.50
April	177.6	26.79	175.2	170.0	721.9	709.1	13.82	13.58
May	168.3	26.66	158.4	153.1	664.4	652.7	14.07	13.82
June	150.6	26.15	139.4	134.4	591.2	580.5	14.22	13.96
July	150.7	25.82	141.2	136.4	601.3	590.2	14.28	14.02
August	144.8	25.69	140.7	136.1	592.8	581.8	14.13	13.87
September	139.2	25.40	141.3	137.0	594.5	583.5	14.11	13.85
October	144.2	24.32	155.8	151.3	657.9	646.0	14.17	13.91
November	144.6	22.88	167.0	162.4	706.6	694.0	14.19	13.94
December	151.3	22.03	181.9	176.8	768.4	755.0	14.17	13.92
Year	1864.6	25.06	1950.2	1892.3	8175.3	8029.3	14.06	13.81

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation
T Amb Ambient Temperature
GlobInc Global incident in coll. plane
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
EArray Effective energy at the output of the array
E_Grid Energy injected into grid
EffArrR Effic. Eout array / rough area
EffSysR Effic. Eout system / rough area



ขนาดสายเมนและสายดิน

(1) ตารางแสดงขนาดสายไฟฟ้าตามขนาดของเมนสวิตช์

ลำดับที่	ขนาด เครื่องวัดฯ (แอมแปร์)	เฟส	ขนาดสูงสุด ของเมน (แอมแปร์)	ขนาดต่ำสุดของสายเมนและ (สายต่อหลักดิน) * ตร.มม.			ขนาดท่อน้ำว(มม.)		แรงดันไฟฟ้า ของสายเมน (โวลต์)
				สายเมนในอากาศ	สายแบบหุ้มฉนวน มีเปลือกดินเกาะผนัง	สายเมนในท่อ	สาย THW.	สาย NYV.	
1	5 (15)	1	16	4** (10)	6**(10)	4,10*** (10)	3/4 (20)	1 1/4 (32)	300
2	15 (45)	1	50	10** (10)	16**(10)	16 (10)	1 (25)	1 1/2 (40)	300
3	30 (100)	1	100	25** (10)	-	50 (16)	1 1/2 (40)	2 (50)	300
4	50 (150)	1	125	35** (10)	-	70 (25)	1 1/2 (40)	2 (50)	750
5	15 (45)	3	50	10** (10)	-	16 (10)	1 1/4 (32)	2 (50)	750
6	30 (100)	3	100	25** (10)	-	50 (16)	2 (50)	2 1/2 (65)	750
7	50 (150)	3	125	35** (10)	-	70 (25)	2 (50)	2 1/2 (65)	750
8	200	3	250	95** (25)	-	185 (35)	3 (80)	3 1/2 (90)	750
9	400	3	500	240** (50)	-	500 (70)	5 (125)	6 (150)	750



ขนาดสายและกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 5-20

ขนาดกระแสของสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวนพีวีซี มี/ไม่มีเปลือกนอก สำหรับขนาดแรงดัน (U_0/U) ไม่เกิน 0.6/1

กิโลโวลต์ อุณหภูมิตัวนำ 70 °C อุณหภูมิโดยรอบ 40 °C เดินในท่อร้อยสายในอากาศ

ลักษณะการติดตั้ง	กลุ่มที่ 1				กลุ่มที่ 2			
จำนวนตัวนำกระแส	2		3		2		3	
ลักษณะตัวนำ	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน	แกนเดี่ยว	หลายแกน
รูปแบบการติดตั้ง								
ระบบไฟฟ้า	AC หรือ DC		AC		AC หรือ DC		AC	
รหัสชนิดเคเบิลที่ใช้งาน	60227 IEC 01, 60227 IEC 02, 60227 IEC 05, 60227 IEC 06, 60227 IEC 10, NYY, VCT, IEC 60502-1 และสายที่มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น สายทนไฟ, สายไร้ฮาโลเจน, สายควั่นน้อย							
ขนาดสาย(ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมแปร์)							
1	10	10	9	9	12	11	10	10
1.5	13	12	12	11	15	14	13	13
2.5	17	16	16	15	21	20	18	17
4	23	22	21	20	28	26	24	23
6	30	28	27	25	36	33	31	30
10	40	37	37	34	50	45	44	40
16	53	50	49	45	66	60	59	54
25	70	65	64	59	88	78	77	70
35	86	80	77	72	109	97	96	86
50	104	96	94	86	131	116	117	103
70	131	121	118	109	167	146	149	130
95	158	145	143	131	202	175	180	156

RMUTI

IAPER



Thank you for your attentions