	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 1	**หน่วยที่** 1
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย ความคิดรวบยอดพื้นฐาน	สอนครั้งที่ 1/18
ชื่อเรื่อง ความคิดรวบยอดพื้นฐาน		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

1.1 ระบบของหน่วย (System of Units)
1.2 ปริมาณพื้นฐาน (Basic Quantities)
1.3 องค์ประกอบวงจร (Circuit Elements)
1.4 วงจรแบบตัวต้านทาน (Resistor Circuits)
1.5 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

การได้ทราบนิยามความหมายของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งความแตกต่างระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับ การจำแนกองค์ประกอบวงจรออกเป็นอุปกรณ์พาสซีฟ (อุปกรณ์เฉื่อยงาน) และอุปกรณ์แอกทีฟ (อุปกรณ์ไวงาน) อุปกรณ์ทั้งสองนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็นแบบอิสระและแบบไม่อิสระ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานเหล่านี้จะเป็นงานพื้นฐานที่จะใช้ศึกษาเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับระบบของหน่วย ปริมาณพื้นฐาน องค์ประกอบวงจรและวงจรแบบตัวต้านทาน

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. บอกระบบของหน่วยในระบบ SI ได้
2. อธิบายปริมาณประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานได้
3. จำแนกองค์ประกอบวงจรแบบแอกทีฟและแบบพาสซีฟได้
4. อธิบายแหล่งกำเนิดอิสระและแหล่งกำเนิดไม่อิสระได้
5. อธิบายการให้สัญลักษณ์เครื่องหมายแบบพาสซีฟได้

6. บอกความต้านทานสมมูลของวงจรโดยพื้นฐานทั้ง 3 ชนิดได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

1.1 ระบบของหน่วย (System of Units)

ระบบของหน่วยใช้หาค่าปริมาณที่สามารถวัดได้เป็นตัวเลข ระบบของหน่วยที่เป็นสากลที่มีความสำคัญและใช้มากคือ ระบบของหน่วยนานาชาติ (international system of units: SI) ประกอบด้วยหน่วยพื้นฐาน เมตร (meter: m), กิโลกรัม (kilogram: kg), วินาที (second: s), แอมแปร์ (ampere: A), องศาเคลวิน (degree kelvin: ^{o}K) และแคลเดลา (candela: cd)

1.2 ปริมาณพื้นฐาน (Basic Quantities)

ปริมาณพื้นฐานที่ธรรมดาที่สุดในการวิเคราะห์วงจรคือ ประจุไฟฟ้า โดยเบื้องต้นประจุไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ประจุบวกจะเกี่ยวข้องกับโปรตอน และประจุลบจะเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอน การเคลื่อนที่ของประจุมีความสำคัญที่ใช้ศึกษาให้เข้าใจการทำงานของอุปกรณ์ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่มีผลต่อการถ่ายโอนพลังงาน และปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของประจุถูกจำกัดขอบเขตเป็นเส้นทางปิด ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุนี้เองเป็นตัวบ่งบอกถึงการไหลของกระแสไฟฟ้า ในระบบ SI หน่วยของปริมาณประจุคือ คูลอมบ์ (coulomb: C)

โดยประจุไฟฟ้า 1 C ได้จากการวัดปริมาณประจุในสายไฟฟ้าที่มีขนาดกระแสไฟฟ้า 1 A ในเวลา 1 s หรือ กระแสไฟฟ้า 1 A = 1 C/s (ประจุ 1 C มีอิเล็กตรอนจำนวน $1/(1.602 \times 10^{-19}) = 6.24 \times 10^{18}$ ตัว)

1.3 องค์ประกอบวงจร (Circuit Elements)

1.3.1 แหล่งกำเนิดอิสระ (Independent Sources: IS)

1.3.2 แหล่งกำเนิดไม่อิสระ (Dependent Sources: DS)

1. แหล่งกำเนิดแรงดันแปรตามแรงดันควบคุม (voltage–controlled voltage source: VCVS)
2. แหล่งกำเนิดแรงดันแปรตามกระแสควบคุม (current–controlled voltage source: CCVS)
3. แหล่งกำเนิดกระแสแปรตามแรงดันควบคุม (voltage–controlled current source: VCCS)
4. แหล่งกำเนิดกระแสแปรตามกระแสควบคุม (current–controlled current source: CCCS)

1.4 วงจรแบบตัวต้านทาน (Resistor Circuits)

1.4.1 วงจรอนุกรม

1.4.2 วงจรขนาน

1.4.3 วงจรผสม

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 1/18, คาบที่ 1–5/90)

1. ครูชี้แจงรายละเอียดเกี่ยวกับจุดประสงค์ สมรรถนะและคำอธิบายรายวิชา การวัดผลและประเมินผลการเรียน คุณลักษณะนิสัยที่ต้องการให้เกิดขึ้น และข้อตกลงในการเรียน

2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 1

3. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 4-5 คน และครูให้หนังสือเรียน

4. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

5. ครูสอนเนื้อหาสาระ

6. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นกลุ่ม ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงานกลุ่ม

7. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัด (บางข้อ) และมอบหมายให้ทำแบบฝึกหัดที่เหลือเป็นการบ้าน

8. ครูให้นักศึกษาศึกษาโปรแกรมจำลองวงจร

9. นักเรียนทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 1

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 1, PowerPoint ประกอบการสอน และแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 1	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบสังเกตการทำงานกลุ่มและนำเสนอผลงานกลุ่ม	เกณฑ์ผ่าน 60%
3. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 1	เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 1	เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ตามสภาพจริง	เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 1
2. คะแนนแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 1

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส** 30105-1001. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.
2. Boylestad, Robert. (2003). **Introductory Circuit Analysis**.
3. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**
4. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice.**

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. แนวทางการแก้ปัญหา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ .....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 2	หน่วยที่ 2
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์	สอนครั้งที่ 2/18
ชื่อเรื่อง การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

2.1 กฎของโอห์ม (Ohm's Law)

2.2 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Laws)

2.3 วงจรที่มีลูปเดียว (Single–Loop Circuits)

2.4 วงจรที่มีคู่ โนดเดียว (Single–Node–Pair Circuits)

2.5 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระ (Circuits with Dependent Source)

2.6 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

กฎของโอห์มและกฎของเคอร์ชอฟฟ์ เป็นกฎพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้า สำหรับวงจรที่มีลูปเดียว (วงจรอนุกรม) มีกฎที่เกี่ยวข้องคือ กฎการแบ่งแรงดันและประยุกต์กฎอื่น สำหรับวงจรที่มีคู่ โนดเดียว (วงจรขนาน) มีกฎที่เกี่ยวข้องคือ กฎการแบ่งกระแสและประยุกต์กฎอื่น ส่วนวงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระเป็นวงจรที่มีแหล่งกำเนิดที่แปรตามการควบคุมซึ่งใช้สร้างแบบจำลองอุปกรณ์เชิงฟิสิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไบโพลาร์

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกฎของโอห์ม กฎของเคอร์ชอฟฟ์ วงจรที่มีลูปเดียว วงจรที่มีคู่ โนดเดียว และ

วงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระ

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. ประยุกต์ใช้กฎของโอห์มหาค่าในวงจรไฟฟ้าได้
2. ประยุกต์ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์หาค่าในวงจรไฟฟ้าได้
3. วิเคราะห์วงจรที่มีลูปเดียวโดยใช้กฎการแบ่งแรงดันและกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้
4. วิเคราะห์วงจรที่มีคู่ โนดเดียว โดยใช้กฎการแบ่งกระแสและกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้
5. วิเคราะห์วงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

2.1 กฎของโอห์ม (Ohm's Law)

กฎของโอห์ม กล่าวว่า แรงดันตกคร่อมความต้านทานจะแปรผันตรงกับกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานนั้น มีหน่วยวัดเป็น โอห์ม (ohm: Ω)

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามกฎของโอห์ม เป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$v(t) = R \times i(t), \quad \text{เมื่อ } R \geq 0 \qquad \text{..... 2.1}$$

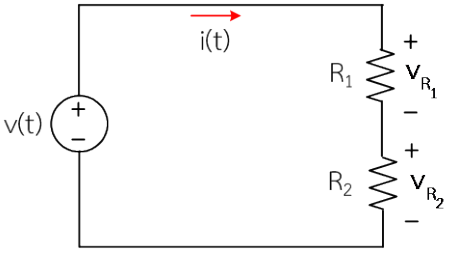
2.2 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Laws)

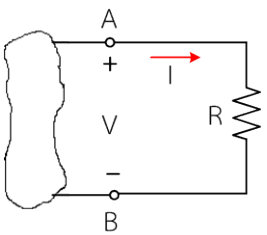
2.2.1 กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law)

2.2.2 กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law)

2.3 วงจรที่มีลูปเดียว (Single–Loop Circuits)

2.3.1 การแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Division) การประยุกต์ใช้กฎที่กล่าวมาเพื่อการวิเคราะห์วงจรที่มีเส้นทางปิดเดียวหรือลูปเดียวขององค์ประกอบวงจร วงจรที่มีลูปเดียวกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบทุกตัวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า "วงจรที่มีลูปเดียวคือวงจรอนุกรม" และสามารถประยุกต์ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ร่วมกับกฎของโอห์มเพื่อหาค่าปริมาณต่าง ๆ ในวงจร ดังรูป





ก) วงจรที่มีลูปเดียวหรือวงจรอนุกรม ข) อธิบายการให้เครื่องหมาย +, – (V = IR)

รูป วงจรที่มีลูปเดียวหรือวงจรอนุกรมและอธิบายการให้เครื่องหมาย

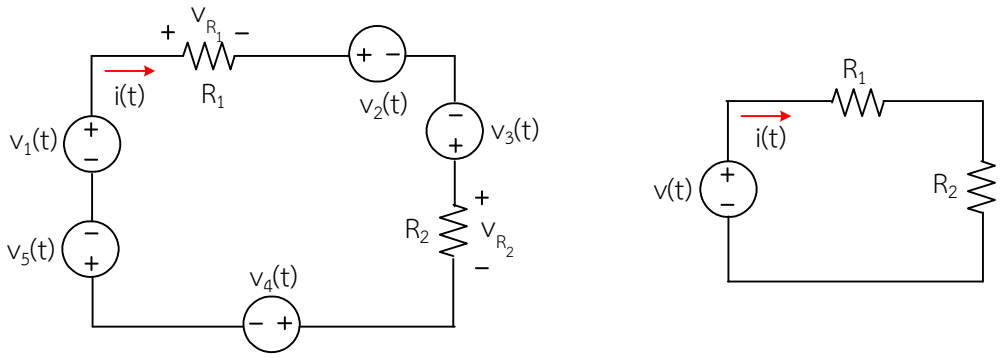
2.3.2 วงจรหลายแหล่งกำเนิดและหลายตัวต้านทาน การวิเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันหลายตัวและตัวต้านทานหลายตัว ต่อแบบเรียงลำดับหรือต่ออนุกรม ดังรูป ถ้าสมมติให้กระแส i(t) ไหลในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและใช้ KVL ในวงจรได้เป็น

$$+ v_{R_1} + v_2(t) - v_3(t) + v_{R_2} + v_4(t) + v_5(t) - v_1(t) = 0$$

หรือใช้กฎของโอห์ม ได้เป็น

$$(R_1 + R_2)i(t) = v_1(t) - v_2(t) + v_3(t) - v_4(t) - v_5(t)$$

เขียนใหม่ได้เป็น $(R_1 + R_2)i(t) = v(t)$

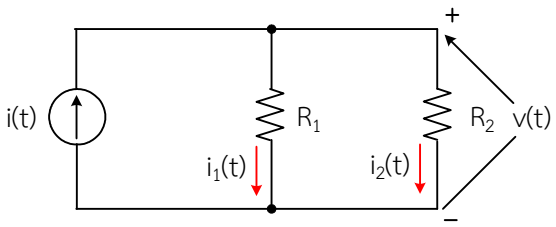


ก) วงจรที่มีหลายแหล่งกำเนิด ข) วงจรสมมูลของรูป ก)

รูป วงจรที่มีหลายแหล่งกำเนิดและหลายตัวต้านทาน

2.4 วงจรที่มีคู่ โนดเดียว (Single–Node–Pair Circuits)

2.4.1 การแบ่งกระแสไฟฟ้า (Current Division) ความสำคัญของวงจรที่มีคู่ โนดเดียวคือเป็นวงจรที่มีแรงดันตกคร่อมองค์ประกอบวงจรเท่ากันทุกสาขา จึงเรียกได้ว่าเป็น “วงจรขนาน” จะประยุกต์ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์และกฎของโอห์ม เพื่อหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในวงจร ดังรูป ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสอิสระต่อขนานด้วยตัวต้านทาน 2 ตัว



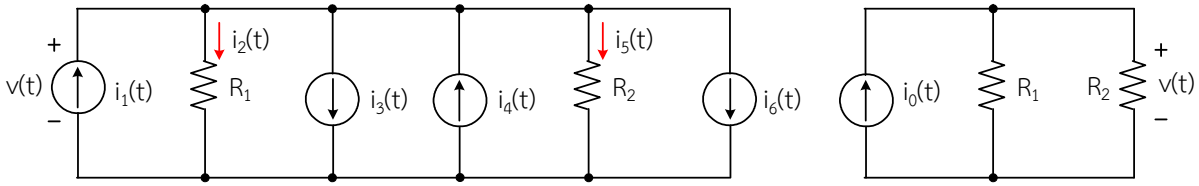
รูป วงจรขนาน

2.4.2 วงจรหลายแหล่งกำเนิดและหลายตัวต้านทาน เมื่อวิเคราะห์วงจรที่มีแหล่งกำเนิดกระแสหลายตัวและตัวต้านทานหลายตัวต่อขนานกัน ดังรูป ก) สมมติให้โนดบน คือ +v(t) เมื่อเทียบกับโนดล่าง เมื่อประยุกต์ใช้ KCL ที่โนดบน ได้เป็น

$$i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) = 0$$

หรือ

$$i_1(t) - i_3(t) + i_4(t) - i_6(t) = i_2(t) + i_5(t)$$



ก) ข) วงจรสมมูลของรูป ก)

รูป วงจรที่มีแหล่งกำเนิดกระแสและตัวต้านทานหลายตัวต่อขนานและวงจรสมมูล

2.5 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระ (Circuits with Dependent Source)

แหล่งกำเนิดที่แปรตามการควบคุมนี้มีความ สำคัญอย่างยิ่ง เพราะใช้สร้างแบบจำลองอุปกรณ์เชิงฟิสิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (bipolar junction transistors: BJTs) ชนิด npn และ pnp และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field–effect transistors: FETs) เช่น มอสเฟต (metal–oxide–semiconductor field–effect transistors: MOSFETs) โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์เหล่านี้ได้ใช้ในอุปกรณ์แอนะล็อกและดิจิทัล ชนิดของอุปกรณ์แอนะล็อกที่ใช้คือ ออปแอมป์ (operational amplifier: OP–Amp) ชนิดของอุปกรณ์ดิจิทัล คือ แรม (random access memories: RAMs), รอม (read–only memories: ROMs) และไมโครโปรเซสเซอร์

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 2/18, คาบที่ 6–10/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 2
3. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 4-5 คน
4. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

5. ครูสอนเนื้อหาสาระ

6. นักศึกษาทำแบบฝึกหัด (บางข้อ) เป็นกลุ่ม ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงานกลุ่ม

7. นักศึกษาลงฝึกปฏิบัติจำลองการทำงานวงจรในแบบฝึกหัด (เลือกกลุ่มละข้อ) ด้วยโปรแกรม

8. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 2

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 2, PowerPoint ประกอบการสอน และแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 2	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบสังเกตการทำงานกลุ่มและนำเสนอผลงานกลุ่ม	เกณฑ์ผ่าน 60%
3. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 2/เลือกแบบฝึกหัดจำลองโปรแกรม	เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 2	เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ตามสภาพจริง	เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 2

2. คะแนนแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 2

3. ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001.** (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

2. Baker, Tim. (2002). **Experiments in DC/AC Circuits with Concepts**.

3. Boylestad, Robert. (2003). **Introductory Circuit Analysis**.

4. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**

5. _____ . (2005). **Introductory DC/AC Circuits**

6. Floyd, Thomas L. (2001). **Electronic Fundamentals**.

7. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice**.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 3	หน่วยที่ 3
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีโนดและวิธีลูป	สอนครั้งที่ 3/18
ชื่อเรื่อง การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีโนดและวิธีลูป		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

3.1 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีโนด (Nodal Analysis)

3.2 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีลูป (Loop Analysis)

3.3 วงจรที่มีออปแอมป์ (Circuit with Operational Amplifiers)

3.4 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีโนดและด้วยวิธีลูปเป็นวิธีวิเคราะห์วงจรข่ายอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาวงจร ไฟฟ้า โดยวิธีโนดจะหาค่าแรงดันโนดและใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ส่วนวิธีลูปจะใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) หาค่ากระแสในวงจรกับวงจรที่มีเฉพาะแหล่งกำเนิดอิสระและวงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระ

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีโนดและวิธีลูป

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีโนดได้
2. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีลูปได้
3. วิเคราะห์วงจรที่มีออปแอมป์ได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

3.1 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีโนด (Nodal Analysis)

3.1.1 วงจรที่มีเฉพาะแหล่งกำเนิดกระแสอิสระ

3.1.2 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดกระแสไม่อิสระ

3.1.3 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดแรงดันอิสระ

3.2 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีลูป (Loop Analysis)

3.2.1 วงจรที่มีเฉพาะแหล่งกำเนิดแรงดันอิสระ

3.2.2 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดกระแสอิสระ

3.2.3 วงจรที่มีแหล่งกำเนิดไม่อิสระ

3.3 วงจรที่มีออปแอมป์ (Circuit with Operational Amplifiers)

3.3.1 โครงสร้างภายนอก สัญลักษณ์ และขาของออปแอมป์

3.3.2 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

3.3.3 วงจรขยายไม่กลับเฟส (Noninverting Amplifier)

3.3.4 วงจรขยายผลบวก (Summing Amplifier)

3.3.5 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 3/18, คาบที่ 11–15/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 3
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นคนละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
8. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 3

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 3, PowerPoint ประกอบการสอน และแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 3	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 3	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 60%
3. แบบฝึกหัด (ข้อที่เลือกใช้จำลองด้วยโปรแกรม)	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 2	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำแบบฝึกหัดข้อที่เลือกจำลองด้วยโปรแกรมให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 3

2. ผลการทำและนำเสนอแบบจำลองวงจร

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 3

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 4	หน่วยที่ 4
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยทฤษฎีต่าง ๆ	สอนครั้งที่ 4-5/18
ชื่อเรื่อง การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยทฤษฎีต่าง ๆ		จำนวน 10 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

4.1 บทนำ (Introduction)

4.2 ทฤษฎีบทการซ้อนทับ (Superposition Theorem)

4.3 ทฤษฎีบทของเทวินินและนอร์ตัน (Thevenin's and Norton's Theorem)

4.4 ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem)

4.5 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

ทฤษฎีบทการซ้อนทับ ทฤษฎีบทของเทวินินและนอร์ตัน ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นทฤษฎีที่นำมาใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้ามาก การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ซับซ้อนสามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยการแทนที่ส่วนที่เหลือของวงจรให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลแบบง่ายแล้วเลือกวิธีวิเคราะห์ที่สะดวกที่สุด

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์วงจรด้วยทฤษฎีบทการซ้อนทับ ทฤษฎีบทของเทวินินและนอร์ตัน และทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยทฤษฎีบทการซ้อนทับได้
2. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยทฤษฎีบทของเทวินินได้
3. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยทฤษฎีบทของนอร์ตันได้
4. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

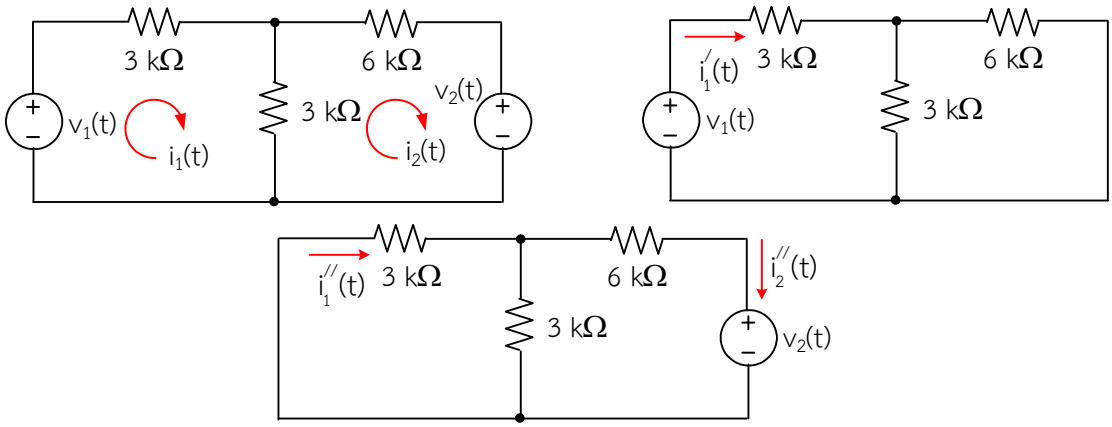
4.1 บทนำ (Introduction)

4.1.1 การสมมูล (Equivalent)

4.1.2 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

4.2 ทฤษฎีบทการซ้อนทับ (Superposition Theorem)

หลักการของทฤษฎีบทการซ้อนทับ (the principle of superposition theorem)[1] กล่าวว่า “ผลตอบสนองของกระแสหรือแรงดันของวงจรเชิงเส้นที่มีแหล่งกำเนิดอิสระมากกว่า 1 ตัว สามารถหาได้จากการรวมผลตอบสนองที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอิสระแต่ละตัว”

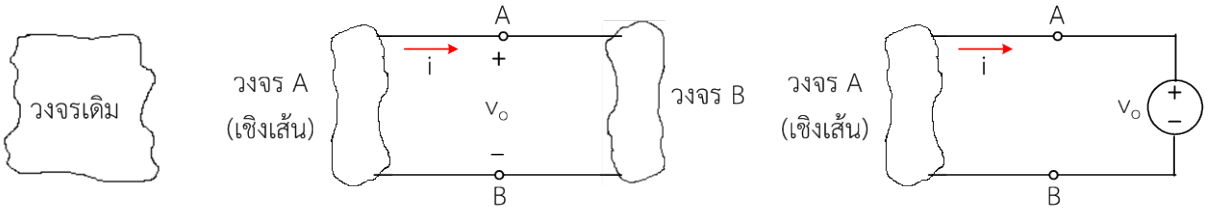


4.3 ทฤษฎีบทของเทวินินและนอร์ตัน (Thevenin’s and Norton’s Theorem)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่เป็นวงจรเชิงเส้นอีก 2 ทฤษฎีให้ง่ายขึ้น ทฤษฎีแรกตั้งชื่อตาม M.L. Thevenin วิศวกรชาวฝรั่งเศส ทำงานด้านการสื่อสารผ่านสายส่ง ได้เผยแพร่เมื่อปี ค.ศ. 1883 เรียกสิ่งที่

ค้นพบว่า ทฤษฎีบทของเทวินิน (Thevenin's theorem)[2] และอีกทฤษฎีหนึ่งค้นพบโดยผลของทฤษฎีบทของเทวินิน ในปี ค.ศ. 1962 ผู้ค้นพบคือ E.L. Norton เป็นนักวิทยาศาสตร์ทำงานที่ bell telephone laboratories เรียกสิ่งที่ค้นพบว่า ทฤษฎีบทของนอร์ตัน (Norton's Theorem)[3] (Irwin, J. David. 2002: 120)

ทฤษฎีทั้งสองนี้มีความสำคัญมาก ใช้พิจารณาวงจรข่ายใด ๆ ระหว่าง 2 ขั้ว และใช้ 2 ขั้วนี้เป็นขั้วตรวจสอบแทนวงจรเดิมเพื่อหาค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าได้ง่ายขึ้นและยังช่วยให้เลือกค่าที่ดีที่สุดของตัวต้านทานโหลด



4.3.1 วงจรที่มีเฉพาะแหล่งกำเนิดอิสระ

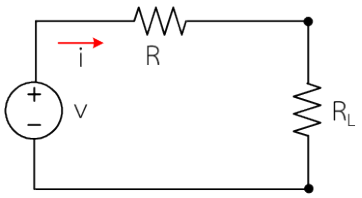
4.3.2 วงจรที่มีเฉพาะแหล่งกำเนิดไม่อิสระ

4.3.3 วงจรที่มีทั้งแหล่งกำเนิดอิสระและแหล่งกำเนิดไม่อิสระ

4.4 ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem)

ในการวิเคราะห์วงจรบางครั้งอาจต้องเพิ่มการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งไปยังโหลดโดยใช้ทฤษฎีบทของเทวินิน การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะต้องประยุกต์วงจรและต้องปรับโหลดให้ถ่ายโอนกำลัง– ไฟฟ้าสูงสุดได้ วงจรดังรูป กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปยังโหลด R_L ได้เป็น

$$P_{load} = i^2 R_L = \left(\frac{v}{R+R_L}\right)^2 R_L$$



รูป วงจรสมมูลสำหรับการทดสอบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 4/18, คาบที่ 16–20/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 4

3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

4. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 4.1-4.2

5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นคนละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน

6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ

7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 5/18, คาบที่ 21–25/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน

2. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

3. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 4.3-4.4

4. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นคนละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน

5. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ

6. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

7. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

8. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 4

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 4, PowerPoint ประกอบการสอน และแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)

1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 4	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 4	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 60%
3. แบบฝึกหัด (ข้อที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม)	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 4	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำแบบฝึกหัดข้อที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 4

2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 4

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส** 30105-1001. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

2. Baker, Tim. (2002). **Experiments in DC/AC Circuits with Concepts**.

3. Boylestad, Robert. (2003). **Introductory Circuit Analysis**.

4. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**

5. _____ . (2005). **Introductory DC/AC Circuits**

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 5	หน่วยที่ 5
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย คุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ	สอนครั้งที่ 6/18
ชื่อเรื่อง คุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

5.1 ตัวเก็บประจุ (Capacitors)

5.2 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)

5.3 การรวมกันของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitor and Inductor Combinations)

5.4 วงจรอาร์ซีออปแอมป์ (RC Operational Amplifier Circuits)

5.5 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ อุปกรณ์ทั้งสองนี้เป็นองค์ประกอบเชิงเส้นและอธิบายคุณสมบัติได้ด้วยสมการอนุพันธ์เชิงเส้น (ตัวต้านทานไม่สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าได้) ซึ่งทั้งสองเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟที่สามารถกักเก็บและจ่ายพลังงานที่จำกัดได้ ไม่เหมือนกับแหล่งกำเนิดแบบอุดมคติ แต่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ไม่จำกัดได้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน–กระแสของอุปกรณ์ทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับเวลา

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและวงจรอาร์ซีออปแอมป์

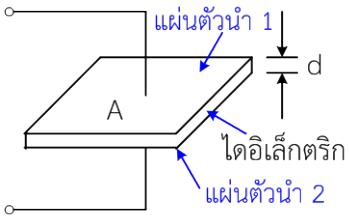
จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. คำนวณค่าความจุ แรงดัน กระแส กำลังและพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุได้
2. วาดรูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังและพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุได้
3. คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ แรงดัน กระแส กำลังและพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำได้
4. วาดรูปคลื่นแรงดัน กระแส กำลังและพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำได้
5. คำนวณผลการต่อตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมและแบบขนานได้
6. คำนวณพารามิเตอร์ของวงจรทำอนุพันธ์และวงจรทำอินทิเกรตได้

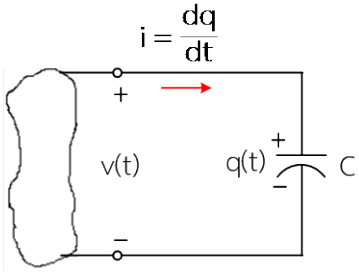
เนื้อหาสาระ /// (Content)

5.1 ตัวเก็บประจุ (Capacitors)

ตัวเก็บประจุ เป็นองค์ประกอบวงจรที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่น มีขนาดพื้นที่ A วางแยกขนานกันด้วยระยะ d มีไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งเป็นวัสดุมีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ ตัวอย่างตัวเก็บประจุและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.1 และให้สัญลักษณ์เครื่องหมายแบบพาสซีฟ (passive sign convention)



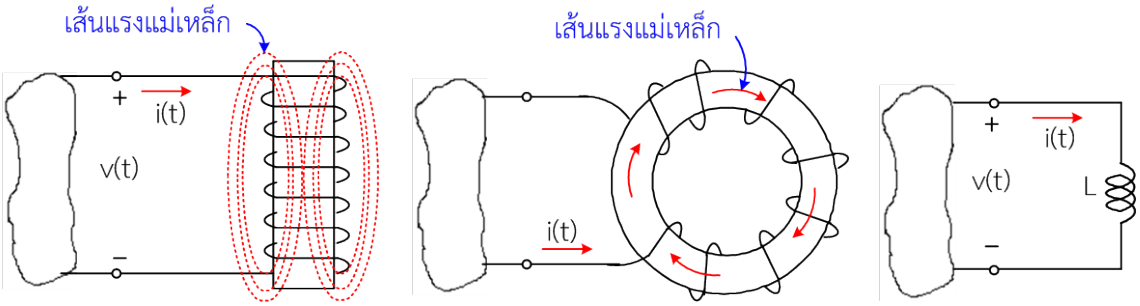
ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ



ข) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า

5.2 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบวงจรที่ประกอบด้วยลวดตัวนำอยู่ในรูปแบบขดลวด (coil) ตัวอย่างตัว–เหนี่ยวนำ 2 ชนิดและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 5.4 แต่ละชนิดจะเรียกตามชนิดของแกน เช่น แกนอากาศ แกนเหล็ก แกนเฟอร์ไรต์ เป็นต้น ตัวเหนี่ยวนำที่ทำจากแกนอากาศหรือวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็กมีใช้อย่างกว้างขวางในวิทยุ โทรทัศน์ และวงจรกรอง (filter circuits) ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กมีใช้มากในเพาเวอร์ซัพ–พลายและวงจรกรอง ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์มีใช้มากในอุปกรณ์ไฟฟ้าความถี่สูง



ก) ตัวเหนี่ยวนำ ข) ตัวเหนี่ยวนำ ค) สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

5.3 การรวมกันของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitor and Inductor Combinations)

5.3.1 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม (Series Capacitors)

5.3.2 ตัวเก็บประจุต่อขนาน (Parallel Capacitors)

5.3.3 ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรม (Series Inductors)

5.3.4 ตัวเหนี่ยวนำต่อขนาน (Parallel Inductors)

5.4 วงจรอาร์ซีออปแอมป์ (RC Operational Amplifier Circuits)

มีสองสิ่งที่สำคัญมากสำหรับวงจรอาร์ซีออปแอมป์ (RC OP–Amp circuits) คือ วงจรทำอนุพันธ์ (differentiator) และวงจรทำอินทิเกรต (integrator) วงจรเหล่านี้ได้รับรูปแบบมาจากวงจรอินเวอร์ติงออป–แอมป์โดยแทนที่ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ด้วยตัวเก็บประจุ (ส่วนตัวเหนี่ยวนำมีแนวโน้มขนาดใหญ่และมีราคาแพง) พิจารณาจากตัวอย่างวงจรดังรูปที่ 5.10 ก) สมการวงจรได้เป็น

$$C_1 \frac{d}{dt}(v_1 - v_-) + \frac{v_o - v_-}{R_2} = i_-$$

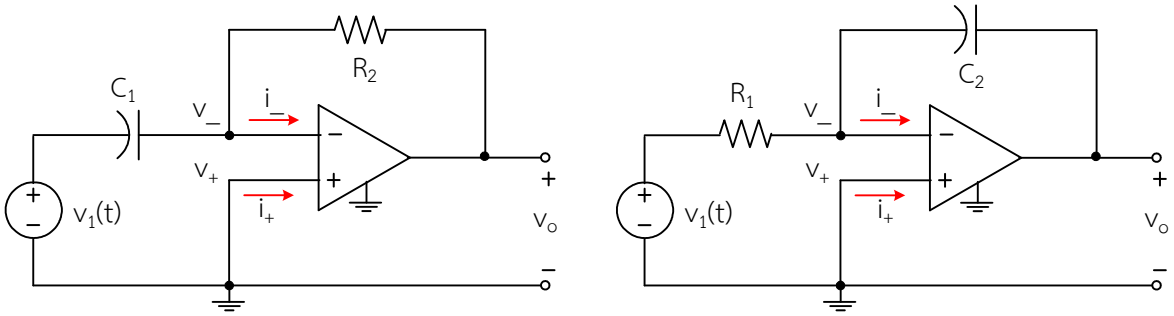
อย่างไรก็ดีเมื่อ $v_- = 0$ และ $i_- = 0$ ดังนั้น

$$v_o(t) = -R_2 C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \qquad \text{..... 5.28}$$

ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรออปแอมป์นี้คือสัดส่วนที่แปรผันตรงกับสัญญาณอินพุต ที่พบว่าใช้อย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ เช่น วงจรตรวจจับความเร็วสามารถต่อเข้ากับวงจรออปแอมป์ที่ให้สัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร่ง หรือสัญญาณเอาต์พุตที่แทนปริมาณประจุที่ตกกระทบบนขั้วโลหะใช้ช่วงเวลาของการอิน–ทิเกรติง (integrating) ค่ากระแสที่วัดได้ เป็นต้น

สมการวงจรสำหรับโครงสร้างภายนอกออปแอมป์ในรูปที่ 5.10 ข) คือ

$$\frac{v_1 - v_-}{R_1} + C_2 \frac{d}{dt}(v_o - v_-) = i_-$$



ก) วงจรทำอนุพันธ์ ข) วงจรทำอินทิเกรต

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 6/18, คาบที่ 26–30/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 5
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
7. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 5

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 5, PowerPoint ประกอบการสอน และแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด
2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 5	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 5	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัด ข้อที่เลือกจำลองด้วยโปรแกรม	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 5	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์
2. ให้ทำแบบฝึกหัดข้อที่เลือกจำลองด้วยการทำงานด้วยโปรแกรมให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 5
2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองการทำงานวงจรด้วยโปรแกรม
3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 5
4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.
2. Baker, Tim. (2002). **Experiments in DC/AC Circuits with Concepts**.
3. Floyd, Thomas L. (2001). **Electronic Fundamentals**.
4. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice**.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. แนวทางการแก้ปัญหา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ตัวแทนนักศึกษา

ลงชื่อ.....

(.....)

ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 6	**หน่วยที่ 6**
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย ผลตอบสนองของวงจร RLC ต่อไฟฟ้ากระแสตรง	สอนครั้งที่ 7-8/18
ชื่อเรื่อง ผลตอบสนองของวงจร RLC ต่อไฟฟ้ากระแสตรง		จำนวน 10 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

6.1 บทนำ

6.2 รูปแบบทั่วไปของสมการตอบสนอง

6.3 ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RC ต่อแรงดันกระแสตรง

6.4 ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RL ต่อแรงดันกระแสตรง

6.5 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

การวิเคราะห์วงจรอันดับหนึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุตัวเดียวหรือตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว เป็นการศึกษาพฤติกรรมวงจรในการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่า การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลจากตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำหรือทั้งคู่ ซึ่งทั้งสององค์ประกอบนี้สามารถทำการสะสมพลังงานและคายพลังงานในบางช่วงเวลาได้ ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RC แบ่งเป็นขณะอัดประจุและขณะคายประจุ ส่วนผล
ตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RL แบ่งเป็นขณะสะสมพลังงานและขณะปล่อยพลังงาน

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรทรานเซียนต์อันดับหนึ่ง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. อธิบายคุณลักษณะการสะสมพลังงานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำได้
2. บอกรูปแบบทั่วไปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้
3. คำนวณผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RC ขณะอัดประจุและขณะคายประจุได้
4. คำนวณผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RL ขณะสะสมพลังงานและขณะปล่อยพลังงานได้

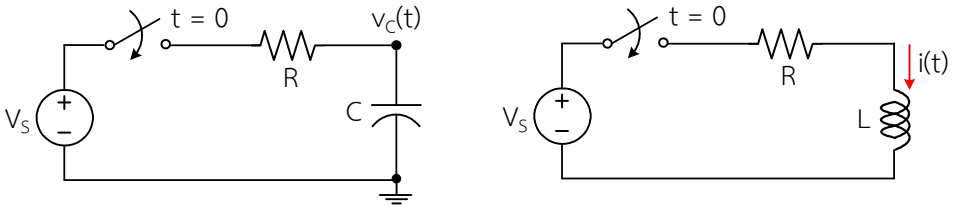
เนื้อหาสาระ /// (Content)

6.1 บทนำ

6.2 รูปแบบทั่วไปของสมการตอบสนอง

วงจรในรูปที่ 6.4 ก) พิจารณาที่เวลา t = 0 เมื่อสวิตช์ปิด ประยุกต์ใช้ KCL ที่โนด $v_C(t)$ เพื่อหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ สำหรับ t = 0 คือ

$$C\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{v(t) - V_S}{R} = 0$$



ก) วงจร RC ข) วงจร RL

รูปที่ 6.4 วงจร RC และวงจร RL

หรือ $$\frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{RC} = \frac{V_S}{RC}$$

จากที่กล่าวมา จึงได้สมมติให้ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งอยู่ในเทอม

$$v(t) = A_1 + A_2e^{-t/\tau}$$

แทนค่าผลเฉลยนี้ลงในสมการอนุพันธ์ ได้เป็น

$$-\frac{A_2}{\tau}e^{-t/\tau} + \frac{A_1}{RC} + \frac{A_2}{RC}e^{-t/\tau} = \frac{V_S}{RC}$$

พิจารณาค่าคงที่ในสมการและในเทอมเอกซ์โพเนนเชียล ได้เป็น

$$A_1 = V_S$$

$$\tau = RC$$

ดังนั้น $$v(t) = V_S + A_2e^{-t/RC}$$

เมื่อ V_S คือ ค่าสถานะอยู่ตัว (steady state) และ RC คือ ค่าคงตัวเวลาของวงจร และ A_2 คือ การหาค่าโดยเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ ถ้าตัวเก็บประจุขณะเริ่มต้นไม่มีประจุหรือไม่ได้ชาร์จไว้ (แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นศูนย์ ที่ t = 0) ดังนั้น

$$0 = V_S + A_2 \quad \text{หรือ} \quad A_2 = -V_S$$

ดังนั้นผลเฉลยสมบูรณ์ (การตอบสนองธรรมชาติ) สำหรับแรงดัน v(t) คือ แรงดันขณะอัดประจุ

$$v_c(t) = V_S - V_Se^{-t/RC} = V_S(1 - e^{-t/RC})$$

วงจรในรูปที่ 6.4 ข) สามารถพิจารณาในทำนองเดียวกัน สมการ KVL ใช้บอกกระแสตัวเหนี่ยวนำสำหรับ $t > 0$ คือ $L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = V_S$

เมื่อดำเนินการกับสมการเช่นเดียวกับสมการของตัวเก็บประจุ ได้เป็น

$$i(t) = \frac{V_S}{R} + A_2 e^{-(R/L)t}$$

เมื่อ V_S/R คือ ค่าสถานะอยู่ตัว และ L/R คือ ค่าคงตัวเวลาของวงจร ถ้าไม่มีกระแสเริ่มต้นในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นที่เวลา t =0:

$$0 = \frac{V_S}{R} + A_2 \quad \text{และ } A_2 = -\frac{V_S}{R}$$

เพราะฉะนั้น

$$i(t) = \frac{V_S}{R} - \frac{V_S}{R} e^{-(R/L)t}$$

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

ถ้าต้องการคำนวณแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน ได้เป็น

$$v_R(t) = Ri(t)$$

$$= V_S(1 - e^{-(R/L)t}$$

6.3 ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RC ต่อแรงดันกระแสตรง

6.3.1 ภาวะชั่วครู่ขณะตัวเก็บประจุอัดประจุไฟฟ้า (Charge Transients)

6.3.2 ภาวะชั่วครู่ขณะตัวเก็บประจุคายประจุไฟฟ้า (Discharge Transients)

6.3.3 ภาวะเริ่มต้นและสถานะอยู่ตัว

6.4 ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ของวงจร RL ต่อแรงดันกระแสตรง

6.4.1 ภาวะชั่วครู่ขณะตัวเหนี่ยวนำสะสมพลังงาน

6.4.2 ภาวะชั่วครู่ขณะตัวเหนี่ยวนำปล่อยพลังงาน

6.4.3 ภาวะเริ่มต้นและสถานะอยู่ตัว

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 7/18, คาบที่ 31–35/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 6
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 6.1-6.3
5. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่ม ๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 8/18, คาบที่ 36–40/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอน
2. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
3. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 6.4
4. นักศึกษาเลือกทำแบบฝึกหัด ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
5. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
6. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม
7. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
8. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 6

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 6, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด
2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 6	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 6	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัด ข้อที่เลือกจำลองด้วยโปรแกรม	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 6	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์
2. ให้ทำแบบฝึกหัดข้อที่เลือกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 6
2. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดข้อที่เลือกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม
3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 6
4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.
2. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**
3. _____ . (2005). **Introductory DC/AC Circuits**
4. Floyd, Thomas L. (2001). **Electronic Fundamentals.**
5. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice.**

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. แนวทางการแก้ปัญหา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ตัวแทนนักศึกษา

ลงชื่อ.....

(.....)

ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 7	หน่วยที่ 7
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย ผลตอบสนองของวงจร RLC ต่อไฟฟ้ากระแสสลับ	สอนครั้งที่ 9-10/18
ชื่อเรื่อง ผลตอบสนองของวงจร RLC ต่อไฟฟ้ากระแสสลับ		จำนวน 10 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

7.1 สัญญาณรูปคลื่นไซน์
7.2 เฟสเซอร์
7.3 ความสัมพันธ์ทางเฟสเซอร์สำหรับองค์ประกอบวงจร
7.4 อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์
7.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรม
7.6 เทคนิคการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า
7.7 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

สัญญาณรูปคลื่นไซน์จึงเป็นฟังก์ชันที่สำคัญมากในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า “เฟสเซอร์” เป็นจำนวนเชิง– ซ้อนที่ใช้แทนขนาดและมุมเฟส (ทิศทาง) ของรูปคลื่นไซน์ อิมพีแดนซ์เป็นอัตราส่วนของเฟสเซอร์แรงดันที่ตก–คร่อมตัวมันกับเฟสเซอร์กระแสที่ไหลผ่านตัวมัน และแอดมิตแตนซ์เป็นส่วนกลับของอิมพีแดนซ์ เทคนิคการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า มีขั้นตอนคือ (1) แปลงองค์ประกอบวงจรให้เป็นวงจรทางเฟสเซอร์ (2) แก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น กฎพื้นฐาน (กฎของโอห์มและกฎของเคอร์ชอฟฟ์) วิธีเมช วิธีโนด การแปลงแหล่งกำเนิด ทฤษฎีบทการซ้อนทับ ทฤษฎีบทของเทวินิน และทฤษฎีบทของนอร์ตัน เป็นต้น (3) แปลงคำตอบที่ได้ในรูปเฟสเซอร์โดเมนให้อยู่ในรูปไทม์โดเมน

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์และเฟสเซอร์

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

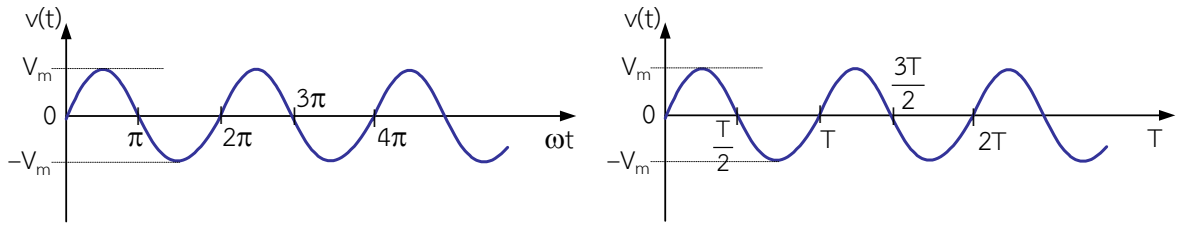
1. คำนวณค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นไซน์ได้
2. ใช้เฟสเซอร์วิเคราะห์วงจรได้

3. แปลงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากรูปไทม์โดเมนไปเป็นเฟสเซอร์โดเมนได้
4. คำนวณอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ของวงจรได้
5. เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรได้
6. วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีหรือทฤษฎีต่าง ๆ ได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

7.1 สัญญาณรูปคลื่นไซน์

เมื่อพิจารณาแรงดันรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 7.1 และการเขียน**สมการค่าชั่วขณะ**ดังสมการที่ 7.1



ก) เมื่อเป็นฟังก์ชันของ ωt ข) เมื่อเป็นฟังก์ชันของ t

รูปที่ 7.1 รูปคลื่นไซน์ของ $V_m \sin \omega t$

ได้เป็น $v(t) = V_m \sin \omega t$ 7.1

โดยที่ V_m คือ ขนาด (amplitude) ของรูปคลื่นไซน์

ω คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) ในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

ωt คือ อาร์กิวเมนต์ (argument) ของรูปคลื่นไซน์

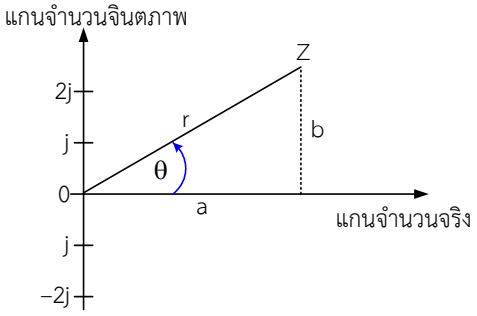
7.2 เฟสเซอร์

เฟสเซอร์ เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่ใช้แทนขนาดและมุมเฟส (ทิศทาง) ของรูปคลื่นไซน์ ซึ่งสามารถจัดกระทำได้ง่ายกว่าฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ แต่การใช้เฟสเซอร์วิเคราะห์วงจรนั้นจำเป็นต้องทบทวนจำนวนเชิงซ้อนที่เคยศึกษามาก่อน ซึ่งจำนวนเชิงซ้อนที่ใช้มากมี 3 รูปแบบ ที่มีความสัมพันธ์กัน

โดยมีความสัมพันธ์คือ $a = r \cos \theta$, $b = r \sin \theta$, $r = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\theta = \tan^{-1}\frac{b}{a}$,

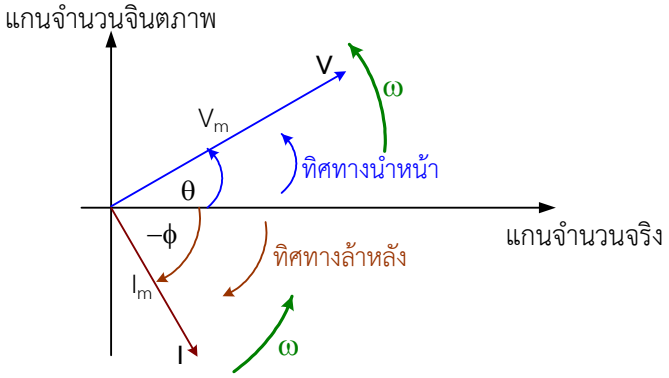
และ $\frac{1}{j} = -j$ ดังนั้น Z จึงเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$Z = a + jb = r\angle\theta = r(\cos\theta + j\sin\theta)$ และอธิบายได้ดังรูปที่ 8.3



รูปที่ 7.3 จำนวนเชิงซ้อน $Z = a + jb = r\angle\theta$

เนื่องจากเฟสเซอร์มีทั้งขนาดและทิศทางและเป็นปริมาณเชิงซ้อนอาจแสดงในรูปพิกัดฉาก รูปเชิงขั้วหรือรูปชี้กำลังก็ได้ เฟสเซอร์จึงเป็นเวกเตอร์หนึ่งเช่นกัน เช่น $V = V_m\angle\theta$ และ $I = I_m\angle -\phi$ วาดได้ดังรูปที่ 7.5 แทนเฟสเซอร์ที่กล่าวนั้นเรียกว่า **แผนภาพเฟสเซอร์หรือเฟสเซอร์ไดอะแกรม** (phasor diagram)



รูปที่ 7.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดง $V = V_m\angle\theta$ และ $I = I_m\angle -\phi$

7.3 ความสัมพันธ์ทางเฟสเซอร์สำหรับองค์ประกอบวงจร

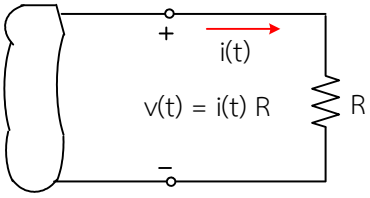
ถ้ามีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน R ดังรูปที่ 7.6 มีค่าเป็น $i = I_m\cos(\omega t + \theta)$ จะมีแรงดันตกคร่อมตัวมันเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ

$$v(t) = Ri(t) = RI_m\cos(\omega t + \theta) \quad \text{..... 7.7}$$

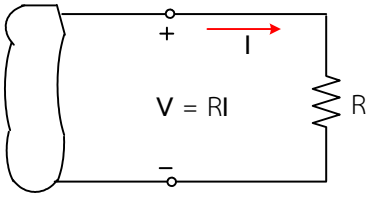
เฟสเซอร์ของแรงดันได้เป็น $V = RI_m\angle\theta$ 7.8

เฟสเซอร์ของกระแสได้เป็น $I = I_m\angle\theta$ 7.9

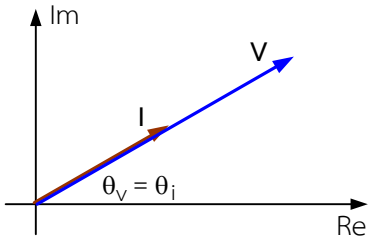
ดังนั้น $V = RI$ 7.10



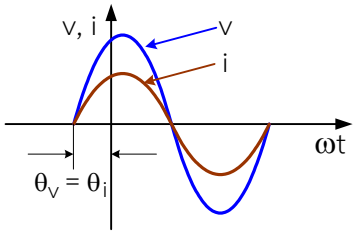
ก) v และ i ในรูปแบบไทม์โดเมน



ข) V และ I ในรูปแบบเฟสเซอร์โดเมน



ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ V และ I



ง) คลื่นไซน์ของ v และ i

รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับตัวต้านทาน

ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับตัวเหนี่ยวนำ (L) ดังรูปที่ 7.7 ถ้าสมมติให้กระแสไหลผ่านเป็น $i = I_m \cos(\omega t + \theta)$ แรงดันตกคร่อมตัวมันคือ

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t + \theta) \quad \text{..... 7.11}$$

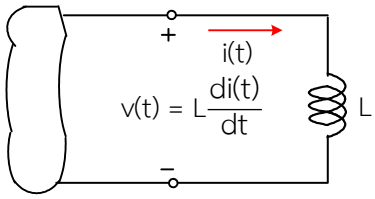
โดยที่ $-\sin A = \cos(A + 90^\circ)$ จึงเขียนแรงดันใหม่ได้เป็น

$$v(t) = \omega L I_m \cos(\omega t + \theta + 90^\circ) \quad \text{..... 7.12}$$

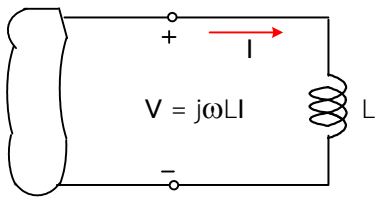
แปลงเป็นเฟสเซอร์ได้เป็น $V = \omega L I_m \angle\theta + 90^\circ$ 7.13

เมื่อ $I = I_m \angle\theta$ และ $e^{j90^\circ} = j$ ดังนั้น

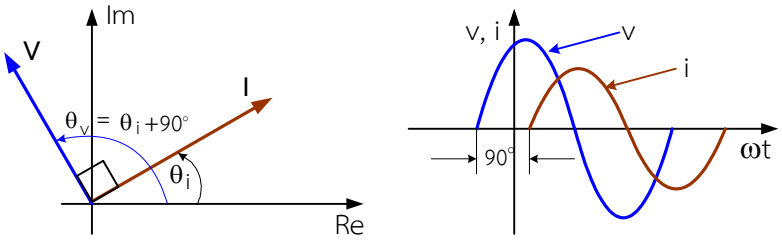
$$V = j\omega L I \quad \text{..... 7.14}$$



ก) v และ i ในรูปแบบไทม์โดเมน



ข) V และ I ในรูปแบบเฟสเซอร์โดเมน



ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ V และ I ง) คลื่นไซน์ของ v และ i (มุมเฟสต่างกัน 90°)

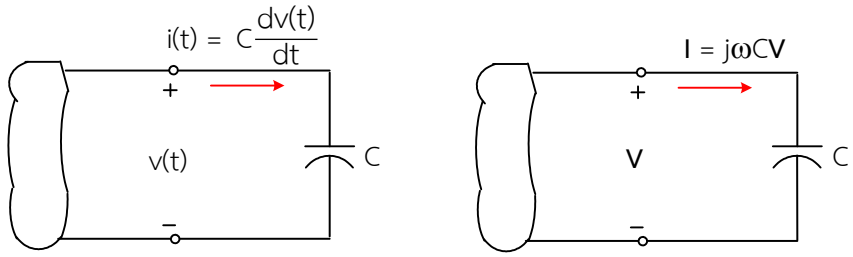
รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับตัวเหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับตัวเก็บประจุ (C) ดังรูปที่ 8.8 ถ้าสมมติให้แรงดันตกคร่อมตัวมันเป็น $v = V_m \cos(\omega t + \theta)$ กระแสที่ไหลผ่านตัวมันคือ

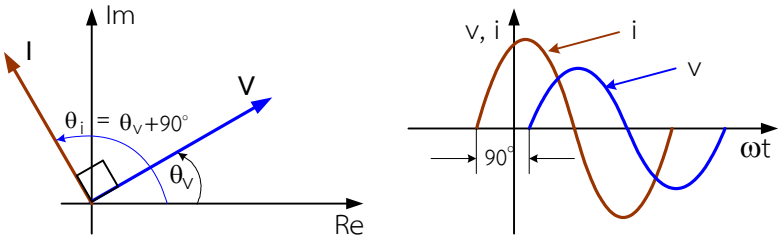
$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt} \qquad \text{..... 7.15}$$

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนเช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำได้เป็น

$$I = j\omega CV \qquad \text{ได้ค่า} \quad V = \frac{I}{j\omega C} \qquad \text{..... 7.16}$$



ก) i และ v ในรูปแบบไทม์โดเมน ข) I และ V ในรูปแบบเฟสเซอร์โดเมน



ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ I และ V ง) คลื่นไซน์ของ i และ v (มุมเฟสต่างกัน 90°)

รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับตัวเก็บประจุ

7.4 อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสสำหรับองค์ประกอบวงจรแบบพาสซีฟทั้ง 3 ตัว คือ R, L และ C ได้แก่ $V = RI$, $V = j\omega LI$ และ $V = I/j\omega C$ ตามลำดับ เมื่อนำมาเขียนในเทอมของอัตราส่วนเฟสเซอร์แรงดัน Vกับเฟสเซอร์กระแส I ได้เป็น

$$\frac{V}{I} = R, \quad \frac{V}{I} = j\omega L, \quad \frac{V}{I} = \frac{1}{j\omega C} \qquad \text{..... 7.17}$$

สมการที่ 8.17 นี้ได้ความสัมพันธ์ตามกฎของโอห์มในรูปเฟสเซอร์สำหรับ R, L และ C คือ

$$Z = \frac{V}{I}, \quad V = ZI \qquad \text{..... 7.18}$$

โดยที่ Z คือ ปริมาณที่ขึ้นอยู่กับความถี่เรียกว่า **อิมพีแดนซ์** (impedance: Z)

ดังนั้น **อิมพีแดนซ์** หมายถึง อัตราส่วนของเฟสเซอร์แรงดัน V กับเฟสเซอร์กระแส I วัดในหน่วยโอห์ม (อิมพีแดนซ์จะแทนการต้านการไหลของกระแสรูปคลื่นไซน์ และตัวมันเองไม่ได้เป็นเฟสเซอร์ เพราะไม่ได้สอดคล้องกับปริมาณที่เปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไซน์)

ปริมาณอื่นที่ใช้มากในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับด้วยขั้วสองขั้วทางอินพุตคือ **แอตมิตแตนซ์** (admittance: Y) ซึ่งเป็นส่วนกลับของอิมพีแดนซ์ วัดในหน่วยซีเมนส์ (siement: S)

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{V} \qquad \text{..... 7.25}$$

7.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมและโลกัสไดอะแกรม

อิมพีแดนซ์ (Z) และแอดมิตแตนซ์ (Y) เป็นฟังก์ชันของความถี่ ดังนั้นค่าจะเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงใน Z และ Y มีผลต่อความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันในวงจรข่ายพารามิเตอร์ในวงจรที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่นั้นสามารถแสดงให้ง่ายขึ้นโดยใช้เฟสเซอร์ไดอะแกรม

7.6 เทคนิคการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับในเฟสเซอร์โดเมนหรือโดเมนของความถี่สามารถใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) และกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ได้ และในสถานะอยู่ตัว (AC steady–state) ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์นั้นสามารถเขียนสมการแต่ละค่าอยู่ในรูปไซน์หรือโคไซน์ได้ ทำให้การคำนวณต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธีโนด การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทการซ้อนทับ และหรือการแปลงแหล่งกำเนิด เป็นต้น สามารถทำได้ง่ายขึ้น และใช้พื้นฐานความรู้จากหน่วยที่ 2, 3 และ 4 ที่กล่าวมาแล้วมาประยุกต์ใช้เช่นเดียวกัน

โดยเทคนิคการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับศึกษาจากตัวอย่าง

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 9/18, คาบที่ 41–45/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 7
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

4. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 7.1-7.3

5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นคนละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน

6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ

7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม

8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 10/18, คาบที่ 46–50/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ

2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 7

3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน

4. ครูสอนเนื้อหาสาระ หัวข้อ 7.4-7.6

5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นคนละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน

6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ

7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม

8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 7

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 7, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 7	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 7	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดข้อที่เลือกจำลองด้วยโปรแกรม	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 7	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%

5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำแบบฝึกหัดที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 7

2. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 7

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001.** (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

2. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**

3. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice.**

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. แนวทางการแก้ปัญหา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ตัวแทนนักศึกษา

ลงชื่อ.....

(.....)

ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 8	**หน่วยที่ 8**
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า	สอนครั้งที่ 11/18
ชื่อเรื่อง วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

8.1 สนามแม่เหล็ก

8.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

8.3 ความซาบซึมได้

8.4 ความต้านทานแม่เหล็ก

8.5 กฎของโอห์มสำหรับวงจรแม่เหล็ก

8.6 แรงทำแม่เหล็ก

8.7 ฮิสเทอรีซิส

8.8 กฎของแอมแปร์

8.9 วงจรแม่เหล็กอนุกรม

8.10 ช่องว่างอากาศ

8.11 วงจรแม่เหล็กอนุกรม–ขนาน

8.12 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

สนามแม่เหล็กเป็นบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กผ่านหรือมีอำนาจแม่เหล็กส่งไปถึง ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นจำนวนเส้นฟลักซ์ต่อหน่วยพื้นที่ ความต้านทานแม่เหล็กได้ $\mathfrak{R} = \ell/\mu A$, กฎของโอห์มสำหรับวงจรแม่เหล็กเป็นไปตามสูตร mmf = NI

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. บอกลักษณะของสนามแม่เหล็กได้
2. คำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้
3. อธิบายความซาบซึมได้ได้
4. คำนวณความต้านทานแม่เหล็กได้
5. ใช้กฎของโอห์มในวงจรแม่เหล็กได้
6. คำนวณแรงทำแม่เหล็กได้
7. อธิบายฮิสเทอรีซิสได้
8. ใช้กฎของแอมแปร์ในวงจรแม่เหล็กได้
9. คำนวณค่าพารามิเตอร์ในวงจรแม่เหล็กได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

8.1 สนามแม่เหล็ก

8.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

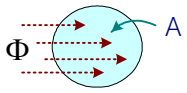
ในระบบหน่วย SI ฟลักซ์แม่เหล็กจะวัดในหน่วยเวเบอร์ ใช้สัญลักษณ์ Φ จำนวนเส้นฟลักซ์ต่อหน่วยพื้นที่เรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ใช้สัญลักษณ์ B วัดในหน่วยเทสลา มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 8.1 และให้ความหมายดังรูปที่ 8.4

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad \text{.....8.1}$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (tesla: T)

Φ คือ จำนวนฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (webers: Wb)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (square meters: m^2)



รูปที่ 8.4 ความหมายของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B

8.3 ความซาบซึมได้

ความสามารถของวัสดุแกนเหล็กที่ยอมให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านไปได้มากน้อยเพียงใดนั้นเรียกว่า ความ–ซาบซึมได้แม่เหล็ก ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กผ่านไปได้มากจะมีความซาบซึมได้แม่เหล็กสูง (high permeability) ความซาบซึมได้ [แทนด้วยสัญลักษณ์อักษร μ (mu อ่านว่า มิว)] ของวัสดุจึงเปรียบเสมือนความนำในวงจร ไฟฟ้า และความซาบซึมได้ของสุญญากาศ (μ_o) คือ

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \quad \frac{Wb}{A \cdot m}$$

8.4 ความต้านทานแม่เหล็ก

ความต้านทานแม่เหล็กของวัสดุจะพิจารณาจากฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุ ซึ่งหาค่าได้จากสมการ

$$\Re = \frac{\ell}{\mu A} \quad (At/Wb) \qquad .....8.3$$

8.5 กฎของโอห์มสำหรับวงจรแม่เหล็ก

ในวงจรแม่เหล็กนั้นผลที่ต้องการคือ ฟลักซ์ (Φ) ซึ่งทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force: mmf) เป็นแรงภายนอก (หรือแรงดัน) ให้ฟลักซ์แม่เหล็กเข้าไปในวัสดุสารแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเปรียบ เสมือน mmf กับ V และ Φ เปรียบได้กับ I และ $\Re$ เปรียบได้กับ R ในวงจรไฟฟ้า ดังนั้น

$$\Phi = \frac{mmf}{\Re} \qquad .....8.4$$

เมื่อ mmf จะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวดรอบแกน (ที่สร้างฟลักซ์) และกระแสจะไหลผ่านรอบของขดลวดนั้น ดังรูปที่ 8.5 สมการได้เป็น

$$mmf = NI \ (At) \qquad .....8.5$$

เมื่อ mmf คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์รอบ (At)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด มีหน่วยเป็นรอบ (turns: t)

I คือ กระแสที่ไหลผ่านรอบของขดลวด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (ampere: A)

8.6 แรงทำแม่เหล็ก

แรงทำแม่เหล็ก (magnetizing force: H) คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ต่อหน่วยความยาว ตามสมการที่ 8.6

$$H = \frac{mmf}{\ell} \quad (At/m) \qquad .....8.6$$

8.7 ฮิสเทอรีซิส

เส้นโค้ง (curve) ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B กับแรงทำแม่เหล็ก H

8.8 กฎของแอมแปร์

ถ้าวิเคราะห์ระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็กและมองเส้นแรงแม่เหล็กเสมือนกระแสไฟฟ้าแล้ว สามารถแสดงให้เห็นขอบเขตของปริมาณได้ดังตารางที่ 8.1

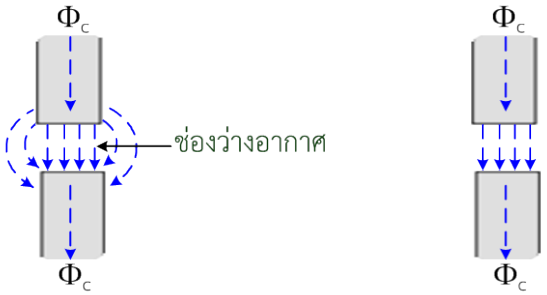
ตารางที่ 8.1 เปรียบเทียบปริมาณทางไฟฟ้ากับปริมาณทางแม่เหล็ก

ปริมาณทางไฟฟ้า	ปริมาณทางแม่เหล็ก
E	mmf
I	Φ
R	$\Re$

8.9 วงจรแม่เหล็กอนุกรม

8.10 ช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ ดังรูปที่ 8.9 ก) จะเห็นได้ว่าฟลักซ์มีการกระจายออกนอกพื้นที่แกนเหล็กสำหรับช่องว่างอากาศ ซึ่งจะไม่ใส่ใจกับผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่รอบนอกแนวแกนเหล็กนี้ แต่จะตั้งสมมติฐานให้ฟลักซ์อยู่ในแนวเดียวกับแกนเหล็กดังรูปที่ 8.9 ข)



ก) ฟลักซ์โดยรอบช่องว่างอากาศ ข) ฟลักซ์โดยรอบช่องว่างอากาศในอุดมคติ

รูปที่ 8.9 ช่องว่างอากาศ

8.11 วงจรแม่เหล็กอนุกรม–ขนาน

8.12 ความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อกระแสไฟฟ้าในขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง (ไม่คงที่) ฟลักซ์แม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดจะเปลี่ยนแปลงด้วย ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงนี้เคลื่อนที่ตัดกับขดลวดจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น

ภายในขดลวด ขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของกระแสรวมทั้งค่าคงที่ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของขดลวด ค่าคงที่นี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำในตัวเอง (self–inductance) หรือค่าความเหนี่ยวนำ (inductance: L) ซึ่งเกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดนั่นเอง

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 11/18, คาบที่ 51–55/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 8
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักเรียนเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 8

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 8, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด
2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 8	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 8	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดข้อที่ใช้จำลองโปรแกรม	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 8	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
5. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจรให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 8

2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจร

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 8

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

2. Baker, Tim. (2002). **Experiments in DC/AC Circuits with Concepts**.

3. Boylestad, Robert. (2003). **Introductory Circuit Analysis**.

4. Cook, Nigel P. (2004). **Electronic. A Complete Course.**

5. _____ . (2005). **Introductory DC/AC Circuits**

6. Floyd, Thomas L. (2001). **Electronic Fundamentals**.

7. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice**.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ตัวแทนนักศึกษา

ลงชื่อ.....

(.....)

ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 9	**หน่วยที่** 9
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ	สอนครั้งที่ 12/18
ชื่อเรื่อง กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง (Topics)

9.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

9.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

9.3 การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด

9.4 ค่าประสิทธิผลหรือค่าอาร์เอ็มเอส

9.5 ตัวประกอบกำลัง

9.6 กำลังเชิงซ้อน

9.7 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

9.8 การวัดกำลังไฟฟ้าในระบบหนึ่งเฟส

9.9 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะใด ๆ คือ p = v(t)i(t), กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P) ในหน่วยวัตต์ เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่จ่ายให้กับอิมพีแดนซ์โดยแหล่งกำเนิดแบบคลื่นไซน์ มีค่า $P = (1/2)V_mI_m\cos(\theta_v-\theta_i)$, ค่าประสิทธิผล สำหรับคลื่นไซน์จะเท่ากับขนาดของสัญญาณหารด้วย $\sqrt{2}$ นั่นคือ $V_{eff} = V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$ หรือ $I_{eff} = I_{rms} = I_m/\sqrt{2}$, ตัวประกอบกำลัง เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูญเสียกับกำลัง ไฟฟ้าปรากฏ ตัวประกอบกำลัง เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูญเสียกับกำลังไฟฟ้าปรากฏ การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟมีค่าน้อยที่สุดโดยใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับโหลด

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าและการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. คำนวณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้
2. แก้ปัญหาวงจรด้วยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดได้
3. คำนวณค่าประสิทธิผลในวงจรได้
4. อธิบายตัวประกอบกำลังได้
5. ใช้กำลังเชิงซ้อนแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าได้
6. คำนวณการปรับปรุงตัวประกอบกำลังได้

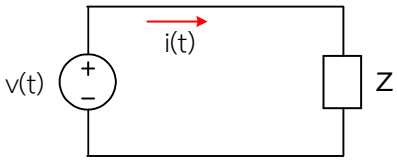
เนื้อหาสาระ /// (Content)

9.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

การคำนวณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ [instantaneous power: p(t)] ที่จ่ายหรือดูดซับโดยอุปกรณ์ใด ๆ นั้นเป็นผลคูณของแรงดันชั่วขณะ [v(t)] ตกคร่อมอุปกรณ์กับกระแสชั่วขณะ [i(t)] ที่ไหลผ่านอุปกรณ์นั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 9.1 โดยทั่วไปแรงดันและกระแสที่สถานะอยู่ตัว (steady–state) สำหรับวงจรข่ายเขียนได้ดังนี้

$$v(t) = V_m\cos(\omega t + \theta_v) \quad \text{.....9.1}$$

$$i(t) = I_m\cos(\omega t + \theta_i) \quad \text{.....9.2}$$



รูปที่ 9.1 โครงข่ายกระแสสลับอย่างง่าย

9.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

ดังนั้นสำหรับวงจรที่มีความต้านทานเพียงอย่างเดียวจะดูดซับกำลังอยู่ตลอดเวลา กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้เป็น

$$P = \frac{1}{2}V_m I_m \qquad \text{.....9.10}$$

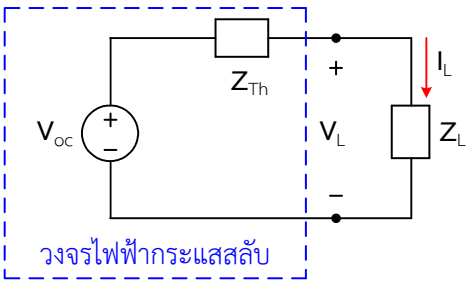
และสำหรับวงจรที่มีรีแอกตีฟ (L หรือ C) อย่างเดียว กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้เป็น

$$P = \frac{1}{2}V_m I_m \cos(90^\circ) = 0$$

เพราะว่าขณะที่อิมพีแดนซ์เป็นรีแอกตีฟอย่างเดียวนั้นค่า**กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่มันดูดซับจะเท่ากับศูนย์** จึงเรียกได้ว่า องค์ประกอบวงจรนั้นคงสภาพไม่มีการสูญเสียต่อไป วงจรข่ายที่เป็นรีแอกตีฟอย่างเดียวจะมีช่วงคาบด้านบวกที่มีการสะสมพลังงาน (stores energy) และช่วงคาบด้านลบจะคายพลังงาน(releases energy) สลับกันไป

9.3 การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด

การแก้ปัญหาการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากวงจรเพื่อจ่ายไปยังโหลด R_L ด้วยวงจรสมมูลเทวินิน ซึ่ง $R_L = R_{Th}$ เมื่อตรวจสอบใหม่โดยแทนที่วงจรสมมูลเทวินินด้วยโหลดอิมพีแดนซ์ (Z_L) ดังรูปที่ 9.2 เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดถูกดูดซับโดยโหลดอิมพีแดนซ์



รูปที่ 9.2 วงจรที่ใช้เป็นตัวอย่างการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด

จากรูปที่ 9.2 สมการสำหรับกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่โหลดคือ

$$P_L = \frac{1}{2}V_L I_L \cos(\theta_{V_L} - \theta_{i_L}) \qquad \text{.....9.11}$$

ขั้นตอนการแก้ปัญหาวงจรด้วยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด

1. ปลดโหลด Z_L ออกและหาวงจรสมมูลเทวินินของวงจรที่เหลือ

2. ได้โครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 11.2

3. เลือก $Z_L = Z_{Th}^* = R_{Th} - jX_{Th}$ และเมื่อ $I_L = V_{oc}/2R_{Th}$ และ $P_L = \frac{1}{2} I_L^2 R_{Th} = V_{oc}^2/8R_T$

9.4 ค่าประสิทธิผลหรือค่าอาร์เอ็มเอส

ค่าประสิทธิผลเป็นค่ารากที่สอง (root) ของค่าเฉลี่ย (mean) ของกำลังสอง (square) ของสัญญาณที่มีคาบนั้น ดังนั้นจึงเรียกกันว่า **ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง** (root–mean–square: rms) หรือเขียนอย่างย่อว่า ค่าอาร์เอ็มเอส ดังนั้นจึงเขียนได้ว่า

$$I_{eff} = I_{rms} \quad \text{และ} \quad V_{eff} = V_{rms}$$

โดยที่กระแสตรงเป็นค่าคงที่ ค่า rms ของกระแสตรงจึงเป็นค่าคงที่ด้วย แต่การหาค่า rms ของรูปคลื่นต่าง ๆ ที่ใช้มากคือรูปคลื่นไซน์ สำหรับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ $i(t) = I_m \cos \omega t$ ได้เป็น

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \cos^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T}\int_0^T \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t)dt}$$

$$= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \quad .....9.23$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับ $v(t) = V_m \cos \omega t$ ได้เป็น

$$V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m \quad .....9.24$$

9.5 ตัวประกอบกำลัง

ตัวประกอบกำลัง (power factor: pf) เป็นปริมาณที่มีความสำคัญมาก ซึ่งเป็นส่วนหลักที่มีผลกระทบใน ทางเศรษฐศาสตร์กับภาคอุตสาหกรรมที่ใช้กำลังไฟฟ้าในปริมาณมาก ในสมการที่ 9.25 เป็นสมการแสดงกำลัง ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งไปยังโหลดในสถานะอยู่ตัวทางไฟฟ้ากระแสสลับ (AC steady state) นั่นคือ

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_v - \theta_i)$$

อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยกับกำลังไฟฟ้าปรากฏ เรียกว่า **ตัวประกอบกำลัง** หรือ**เพาเวอร์แฟกเตอร์** นั่นคือ

$$pf = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}}$$

$$= \frac{P}{V_{rms} I_{rms}}$$

$$pf = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad .....9.27$$

เมื่อ $\cos(\theta_v - \theta_i) = \cos\theta_{Z_L}$ 9.28

9.6 กำลังเชิงซ้อน

เมื่อกำลังเชิงซ้อนในหน่วย VA คือ ผลคูณของค่า rms ของเฟสเซอร์แรงดัน (V_{rms}) กับค่าสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) ของกระแส (I^*_{rms}) ดังนั้นถ้า $I_{rms} = I_{rms}\ \theta_i = I_R + jI_1$ เมื่อ $I^*_{rms} = I_{rms}\ -\theta_i = I_R - jI_1$ กำลังเชิงซ้อนได้เป็น

$$S = V_{rms}\angle\theta_v\, I_{rms}\angle\theta_i = V_{rms}I_{rms}\angle\theta_v - \theta_i \quad .....9.30$$

หรือ $$S = V_{rms}I_{rms}\cos(\theta_v - \theta_i) + jV_{rms}I_{rms}\sin(\theta_v - \theta_i) \quad .....9.31$$

เมื่อ $\theta_v - \theta_i = \theta_Z$ มีข้อสังเกตจากสมการที่ 9.31 นั้นว่า ส่วนจำนวนจริงของกำลังเชิง–ซ้อน (S) จะเป็นกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย และส่วนจินตภาพของ S คือกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ หรือกำลังไฟฟ้าควอเดรเจอร์ (quadrature power) ดังนั้นกำลังเชิงซ้อนสามารถเขียนในรูปแบบอย่างง่ายคือ

$$S = P + jQ \quad .....9.32$$

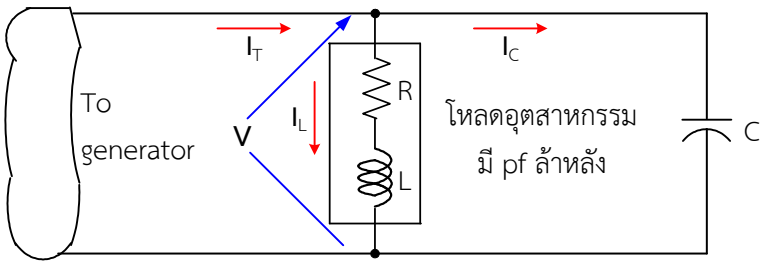
เมื่อ $$P = \mathrm{Re}(S) = V_{rms}I_{rms}\cos(\theta_v - \theta_i) \quad .....9.33$$

$$Q = \mathrm{Im}(S) = V_{rms}I_{rms}\sin(\theta_v - \theta_i) \quad .....9.34$$

จากสมการที่ 9.31 ขนาดของกำลังเชิงซ้อนเรียกว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ และมุมเฟสของกำลังเชิงซ้อนคือ มุมตัวประกอบกำลัง กำลังไฟฟ้าปรากฏนี้วัดในหน่วย **โวลต์–แอมแปร์** (VA) กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยวัดในหน่วย วัตต์ (W) และกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ Q มีหน่วยวัดเหมือนกันกับปริมาณ P, S แต่เพื่อแยกความแตกต่างป้องกันความสับสนจึงกำหนดหน่วยวัดของ Q เป็น **โวลต์–แอมแปร์–รีแอกตีฟ** หรือเรียกสั้น ๆ ว่า วาร์ (VAR)

9.7 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

$$S_{old} = P_{old} + jQ_{old} = |S_{old}|\ \theta_{old}$$



รูปที่ 9.7 วงจรสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลดอินดักตีฟ

กำลังเชิงซ้อนสำหรับตัวเก็บประจุ คือ

$$S_{cap} = 0 + jQ_{cap} = |S_{cap}| \angle -90^{\circ}$$

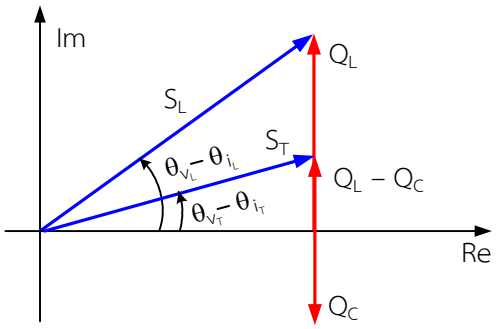
กำลังเชิงซ้อนใหม่เป็นผลจากการเพิ่มตัวเก็บประจุ คือ

$$S_{old} + S_{cap} = S_{new} = P_{old} + jQ_{new} = |S_{new}| \angle \theta_{new} \quad .....9.39$$

เมื่อ θ_{new} เป็นมุมตัวประกอบกำลังตามที่ต้องการ ความแตกต่างระหว่างกำลังเชิงซ้อนเก่ากับกำลังเชิงซ้อนใหม่เป็นผลจากการเพิ่มของตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุนั้นต้องเป็นรีแอกตีฟอย่างเดียว

$$S_{cap} = +jQ_{cap} = -j\omega C V_{rms}^2 \quad .....9.40$$

สมการที่ 9.40 สามารถใช้หาขนาดของ C ที่ต้องการใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังตามที่ต้องการ ขบวนการนี้อธิบายด้วยรูปที่ 9.8 เมื่อ $\theta_{old} = \theta_{V_L} - \theta_{i_L}$ และ $\theta_{new} = \theta_{V_T} - \theta_{i_T}$ อย่างไรก็ดีตัวประกอบกำลังที่ต้องการเฉพาะนี้สำหรับโหลดรวมอย่างง่ายโดยเลือกตัวเก็บประจุอย่างรอบคอบและนำไปต่อขนานกับโหลดเดิม โดยทั่วไปจะต้องการให้ตัวประกอบกำลังสูงขึ้นและดังนั้นมุมตัวประกอบกำลังจะน้อยลง

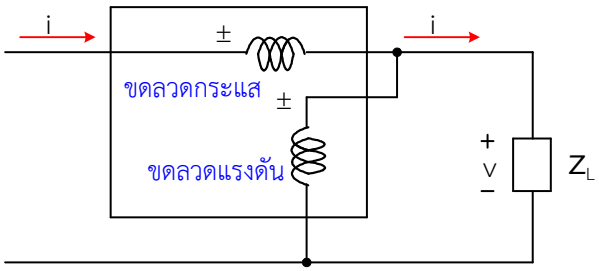


รูปที่ 9.8 เทคนิคสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

9.8 การวัดกำลังไฟฟ้าในระบบหนึ่งเฟส

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหรือกำลังไฟฟ้าจริงที่ดูดซับโดยโหลดจะวัดโดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า วัตต์มิเตอร์ (wattmeter) และวาร์มิเตอร์ (varmeter) ใช้วัดกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ ปริมาณทั้งสองอาจถูกวัดได้ในเวลาเดียว กันหรืออาจใช้พร้อมกันก็ได้

วัตต์มิเตอร์ประกอบขึ้นจากขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดกระแสและขดลวดแรงดัน โดยที่ขดลวดกระแสมีอิมพีแดนซ์ต่ำเข้าใกล้ศูนย์จะต่ออนุกรมกับโหลด และขดลวดแรงดันมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ในทางอุดมคติจะมีค่าเป็นอนันต์และต่อขนานกับโหลด ดังรูปที่ 9.9



รูปที่ 9.9 วงจรการต่อวัตต์มิเตอร์เข้ากับโหลด

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 12/18, คาบที่ 56–60/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 9
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 9

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 9, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียน แบบฝึกหัด
2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับการวงจรไฟฟ้า, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 9	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 9	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%

3. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 9	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 9
2. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 9
3. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001.** (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.
2. Baker, Tim. (2002). **Experiments in DC/AC Circuits with Concepts.**
3. Boylestad, Robert. (2003). **Introductory Circuit Analysis.**
4. Floyd, Thomas L. (2001). **Electronic Fundamentals.**
5. Robbins, Allan H. & Miller, Wilhelm C. (2004). **Circuit Analysis with Devices: Theory and Practice.**

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. แนวทางการแก้ปัญหา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 10	หน่วยที่ 10
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย วงจรไฟฟ้าสามเฟส	สอนครั้งที่ 13-14/18
ชื่อเรื่อง วงจรไฟฟ้าสามเฟส		จำนวน 10 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

10.1 บทนำ
10.2 การต่อสามเฟส
10.3 การต่อแหล่งกำเนิดและการต่อโหลด
10.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า
10.5 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
10.6 การวัดกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส
10.7 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

วงจรไฟฟ้าสามเฟสสมดุล กระแสและแรงดันแต่ละเฟสต่างกัน 120° และการผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปกำลังไฟฟ้าสามเฟส แหล่งกำเนิดสามเฟสสามารถต่อได้ทั้งแบบวายและแบบเดลตา ส่วนตัวโหลดของระบบสามเฟสสามารถต่อได้ทั้งแบบวายและแบบเดลตาเช่นกัน กำลังไฟฟ้าที่ดูดซับโดยโหลดสมดุลทั้งการต่อแบบวายหรือแบบเดลตา คือ $S = P + jQ = \sqrt{3}\, V_L I_L \angle\theta$ การปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยใช้ตัวเก็บประจุ 3 ตัว ต่อขนานกับโหลดสามเฟส

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าสามเฟส

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. อธิบายความสัมพันธ์เฟสของระบบไฟฟ้าสามเฟสได้
2. อธิบายลักษณะการต่อสามเฟสแบบวายและแบบเดลตาได้
3. คำนวณการต่อแหล่งกำเนิดและการต่อโหลดของระบบไฟฟ้าสามเฟสได้
4. คำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าสามเฟสได้

5. อธิบายการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าสามเฟสได้
6. คำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุเพื่อการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าสามเฟสได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

10.1 บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องทำให้มีประสิทธิภาพที่แรงดันสูงมาก ๆ โดยที่แรงดันนี้สามารถปรับจากระดับสูงสุดให้เป็นระดับปกติที่ใช้ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานได้โดยใช้หม้อแปลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าสามเฟส ถ้าแรงดันรูปคลื่นไซน์ทั้งสามขั้วต่อ (ไม่นับขั้วนิวทรัลหรือกราวด์) มีขนาด (amplitude) และความถี่เท่ากัน แรงดันเหล่านี้ไม่ได้อินเฟสกัน แต่ละแรงดันจะต่างเฟส (out of phase) กัน 120° กับอีกสองแรงดัน ซึ่งแรงดันเหล่านี้กล่าวได้ว่า สมดุล (balanced) และถ้าโหลดดึงกระแสเท่ากันทั้งสามเฟสด้วยจะใช้อ้างอิงได้ว่าเป็นวงจร ไฟฟ้าสามเฟสสมดุล (balanced three phase circuit)

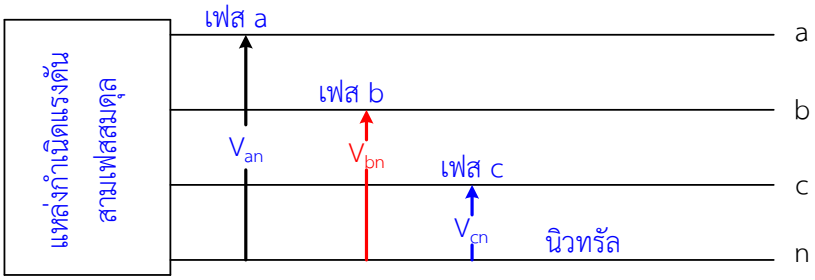
การสมดุลของแรงดันทั้งสามเฟสสามารถแสดงในโดเมนของความถี่ดังรูปที่ 10.1 ก) เมื่อสมมติให้ขนาดของแรงดัน[1] เป็น 220 V rms สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{an} &= 220\angle 0^{\circ} \text{ V rms} \\ V_{bn} &= 220\angle -120^{\circ} \text{ V rms} \\ V_{cn} &= 220\angle -240^{\circ} \text{ V rms} \\ &= 220\angle 120^{\circ} \text{ V rms} \end{aligned} \qquad \text{..... 12.1}$$

10.2 การต่อสามเฟส

แหล่งกำเนิดแรงดันหลายเฟสที่มีความสำคัญมากคือแหล่งกำเนิดสามเฟสสมดุล แหล่งกำเนิดนี้แสดงดังรูปที่ 10.2 มีลักษณะเฉพาะคือ แรงดันเฟสเป็นแรงดันระหว่างไลน์ a, b และ c กับสายนิวทรัล n ได้

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_p\angle 0^{\circ} \\ V_{bn} &= V_p\angle -120^{\circ} \\ V_{cn} &= V_p\angle -240^{\circ} = V_p\angle 120^{\circ} \end{aligned} \qquad \text{..... 10.7}$$



รูปที่ 10.2 แหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสสมดุล

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของ V_{an} , V_{bn} และ V_{cn} ดังรูปที่ 10.3 เรียกแรงดันทั้งสามนี้ว่า แรงดันเฟส (phase voltage: V_p) และมีการเรียงลำดับเฟส[2] (phase sequence) เป็น abc หรือลำดับเฟสแบบบวก ดังรูปที่ 10.3 ก) V_{an} มีมุมเฟสนำ V_{bn} มีมุมเฟสนำ V_{cn} วนเป็นวงกลับไปที่เฟสเริ่มต้น เขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ 10.7 ส่วนรูปที่ 10.3 ข) มีการเรียงลำดับเฟส acb หรือลำดับเฟสแบบลบ สำหรับลำดับเฟสแบบนี้ V_{an} มีมุมเฟสนำ V_{cn} มีมุมเฟสนำ V_{bn} วนเป็นวงกลับไปที่เฟสเริ่มต้น

10.3 การต่อแหล่งกำเนิดและการต่อโหลด

10.3.1 การต่อแบบ Y–Y สมดุล (Balanced Wye–Wye Connection)

10.3.2 การต่อแหล่งกำเนิดแบบเดลตา (Delta–Connection Source)

10.3.3 การต่อโหลดแบบเดลตา (Delta–Connection Load)

10.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

ไม่ว่าโหลดจะต่อแบบวายหรือแบบเดลตา กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (average power or real power) และกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ (reactive power) ต่อเฟสได้เป็น (Irwin, J. David. 2002: 402)

$$P_p = V_p I_p \cos\theta$$

$$Q_p = V_p I_p \sin\theta \qquad \text{..... 10.21}$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างแรงดันเฟสและกระแสเฟส สำหรับระบบการต่อแบบวายนั้น $I_p = I_L$ และ $V_p = V_L/\sqrt{3}$ และสำหรับระบบการต่อแบบเดลตานั้น $I_p = I_L/\sqrt{3}$ และ $V_p = V_L$ ดังนั้น

$$P_p = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3}} \cos\theta$$

$$Q_p = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3}} \sin\theta \qquad \text{..... 10.22}$$

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมและกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟรวมสำหรับสามเฟสทั้งหมด ได้เป็น

$$P_T = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\theta$$

$$Q_T = \sqrt{3}\, V_L I_L \sin\theta \qquad \text{..... 10.23}$$

ดังนั้น ขนาดของกำลังเชิงซ้อน (กำลังไฟฟ้าปรากฏ) คือ

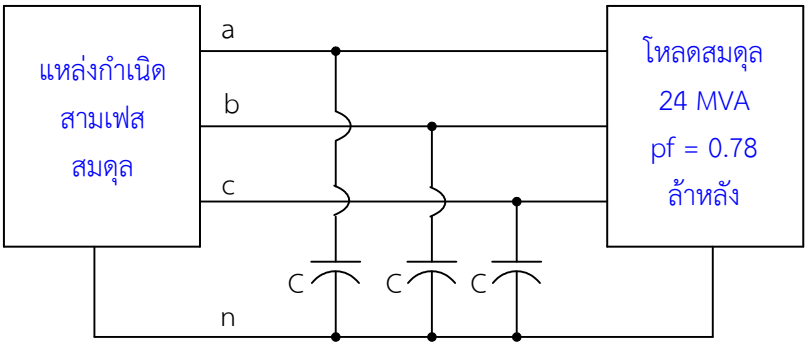
$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

$$= \sqrt{3}\, V_L I_L \qquad \text{..... 10.24}$$

และ $\underline{/S_T} = \theta$

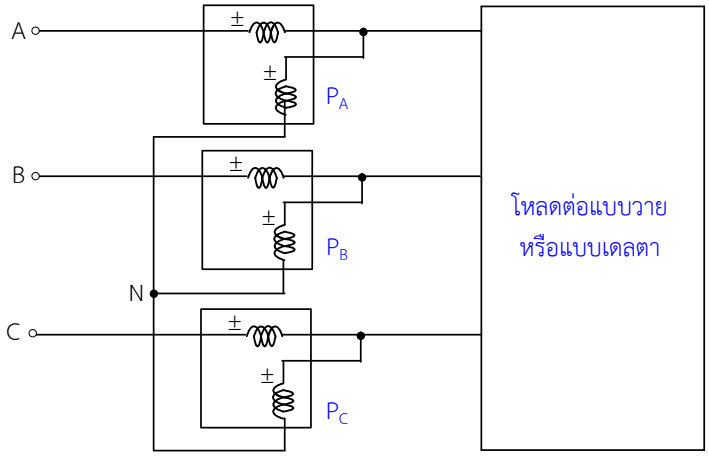
10.5 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

ได้กล่าวถึงเทคนิคง่าย ๆ สำหรับการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลด โดยการนำตัวเก็บประจุต่อขนานกับโหลด การปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบสามเฟสสมดุลจะต้องกระทำอย่างถูกต้องด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องระลึกถึง อย่างไรก็ดี S_{cap} เป็นไปตามสมการที่ 10.40 แต่เป็นเงื่อนไขโดยตัวเก็บประจุ 3 ตัว และในเงื่อนไขนี้ V_{rms} ในสมการจะเป็นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทุกตัว



10.6 การวัดกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส

การวัดกำลังไฟฟ้าโดยใช้วัตต์มิเตอร์ 3 ตัว แต่ละตัวจะวัดกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสของโหลด ผลรวมทางพีชคณิตของค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ทั้ง 3 จะเป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของโหลดในระบบสามเฟส ดังรูปที่ 10.11 ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งโหลดต่อแบบวายหรือแบบเดลตาทั้งสมดุลหรือไม่สมดุล



รูปที่ 10.11 การวัดกำลังไฟฟ้าสามเฟส โดยใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 3 ตัว

จากรูปที่ 10.11 วัดกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของวัตต์มิเตอร์แต่ละตัวได้เป็น

$$P = \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right) I_L \cos\theta$$

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 13/18, คาบที่ 61–65/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 10
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 14/18, คาบที่ 66–70/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 10
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักศึกษาเป็นกลุ่มๆ ละ 2-3 คน จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 10

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 10, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับการวงจรหลายเฟส, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 10	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 10	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดของที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม	ตรวจจากโปรแกรม เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 10	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจรให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 10

2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจร

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 10

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 11	**หน่วยที่** 11
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย วงจรเรโซแนนซ์และวงจรกรอง	สอนครั้งที่ 15/18
ชื่อเรื่อง วงจรเรโซแนนซ์และวงจรกรอง		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

11.1 การเกิดเรโซแนนซ์

11.2 วงจรเรโซแนนซ์ (Resonant Circuits)

11.3 วงจรกรอง (Filter Circuits)

11.4 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นได้ในทุกวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างน้อยอย่างละ 1 ตัว ความถี่เร–โซแนนซ์คือ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, แบนด์วิดท์ของกรองผ่านแถบเป็นความต่างในความถี่ระหว่างจุดครึ่งกำลัง นั่นคือ BW = $\omega_{HI} - \omega_{LO}$ สำหรับวงจร RLC อนุกรมได้ BW = R/L สำหรับวงจร RLC ขนานได้ BW = 1/RC

วงจรกรองที่ประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เรียกว่า วงจรกรองพาสซีพ ส่วนวงจรกรองที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ประเภทแอกทีฟ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ ต่อร่วมกับอุปกรณ์ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เรียกว่า วงจรกรองแอกทีฟ

สมรรถนะย่อย (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับภาวะการเกิดเรโซแนนซ์และวงจรเรโซแนนซ์

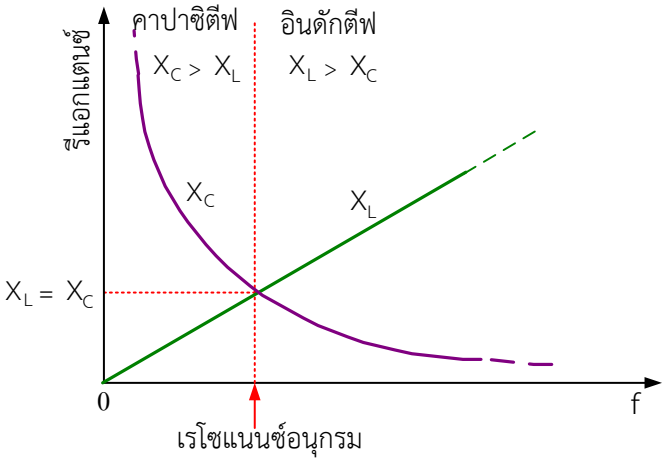
จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objectives)

1. อธิบายการเกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้
2. คำนวณค่าพารามิเตอร์ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมได้
3. คำนวณค่าพารามิเตอร์ในวงจรเรโซแนนซ์ขนานได้
4. คำนวณค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองได้

เนื้อหาสาระ (Content)

10.1 การเกิดเรโซแนนซ์

การเกิดวงจรเรโซแนนซ์ อธิบายได้ดังรูปที่ 10.1 และทบทวนพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากหน่วยที่ 7

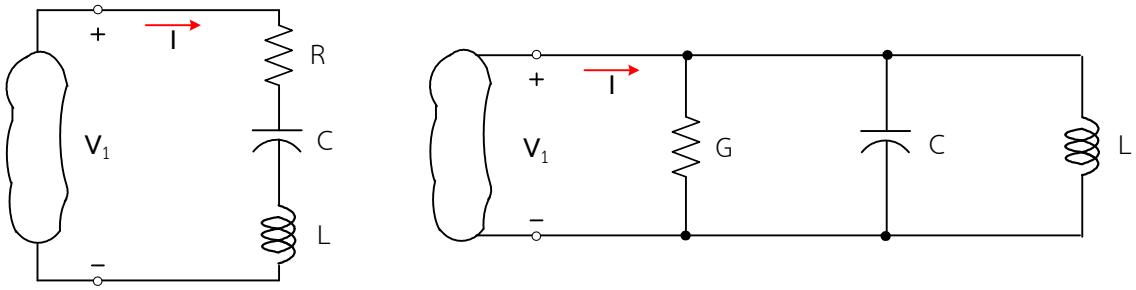


รูปที่ 10.1 การเกิดเรโซแนนซ์อนุกรม

10.2 วงจรเรโซแนนซ์ (Resonant Circuits)

วงจรที่มีคุณลักษณะทางความถี่ที่สำคัญอย่างยิ่ง 2 วงจร คือวงจร RLC อนุกรมและวงจร RLC ขนาน ดังรูปที่ 10.2 อิมพีแดนซ์อินพุตสำหรับวงจร RLC อนุกรม ได้เป็น (Irwin, J. David. 2002: 439)

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad \text{..... 11.1}$$



ก) วงจร RLC อนุกรม ข) วงจร RLC ขนาน

รูปที่ 10.2 วงจร RLC

และแอดมิตแตนซ์อินพุตสำหรับวงจร RLC ขนาน ได้เป็น

$$Y(j\omega) = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \quad \text{..... 10.2}$$

ทั้งสองสมการนี้มีรูปแบบที่เหมือนกัน โดยในเทอมของจำนวนจินตภาพของทั้งคู่จะเป็นศูนย์ ถ้า

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{ดังนั้น} \quad \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

ค่าของ ω ที่ทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขนี้เรียกว่า **ความถี่เรโซแนนซ์** (resonance frequency: ω_0) หรือเรียกว่า ความถี่กำธร ดังนั้นเงื่อนไขการเรโซแนนซ์คือ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{rad/s} \quad \text{..... 10.3}$$

และที่ค่าของ ω_0 นี้ อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรม รูปที่ 11.2 ก) ได้เป็น

$$Z(j\omega_0) = R \quad \text{..... 10.4}$$

ที่ความถี่ ω_0 นี้อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรมและแอดมิตแตนซ์ของวงจรขนาน ทั้งสองวงจรจะมีเพียงส่วนจำนวนจริงอย่างเดียวซึ่งกล่าวได้ว่า วงจรอยู่ในภาวะเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นผลให้แรงดันและกระแสจะมีเฟสร่วมกัน (in phase) ดังนั้นมุมเฟสจึงเป็นศูนย์ และตัวประกอบกำลังมีค่าเป็นหนึ่ง (unity) ในกรณีอนุกรมที่เรโซแนนซ์อิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำสุด และดังนั้นกระแสจะมีค่าสูงสุดตามแรงดันที่จ่ายให้วงจร

11.3 วงจรกรอง (Filter Circuits)

วงจรกรองหรือวงจรฟิลเตอร์ หมายถึง วงจรที่ทำหน้าที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในแถบที่ต้องการผ่านไปปรากฏด้านเอาต์พุต ส่วนสัญญาณที่ไม่ต้องการจะถูกตัดทิ้งหรือลดทอนออกไป

11.3.1 วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filters) 11.3.2 วงจรกรองแอกทีฟ (Active Filters)

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 15/18, คาบที่ 71–75/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 11
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักเรียนเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 11

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 11, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรเรโซแนนซ์และวงจรกรอง, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 11	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 11	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดของที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม	ตรวจจากโปรแกรม เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 11	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจรให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 11

2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจร

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 11

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001.** (2559). นนทบุรี: เมืองไทย.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 12	**หน่วยที่** 12
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย วงจรข่ายสองพอร์ต	สอนครั้งที่ 16/18
ชื่อเรื่อง วงจรข่ายสองพอร์ต		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

12.1 พารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์ (Admittance Parameters)

12.2 พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ (Impedance Parameters)

12.3 พารามิเตอร์ไฮบริด (Hybrid Parameters)

12.4 พารามิเตอร์การส่งผ่าน (Transmission Parameters)

12.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ (Relationships between Parameters)

12.6 การเชื่อมต่อของสองพอร์ต (Interconnection of Two–Ports)

12.7 สรุปสาระสำคัญ (Summary)

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

วงจรข่าย (networks) ที่มีอินพุตสองขั้วและเอาต์พุตสองขั้วเรียกว่า วงจรข่ายสองพอร์ต รูปแบบทั่วไปของพารามิเตอร์สองพอร์ตมี 4 รูปแบบ คือ แอดมิตแตนซ์ อิมพีแดนซ์ ไฮบริด และการส่งผ่าน

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรข่ายสองพอร์ต

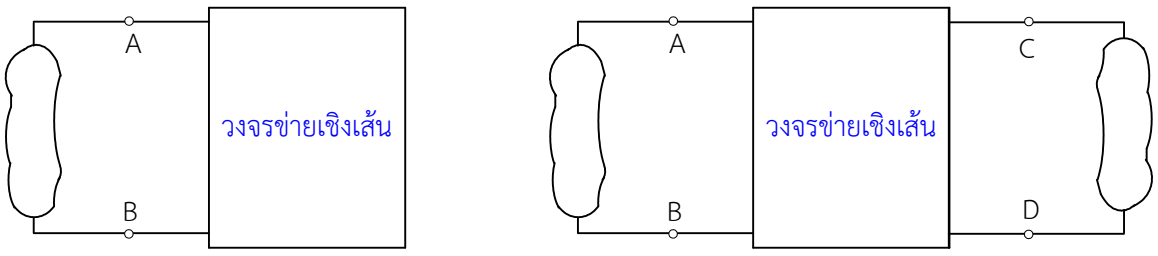
จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. คำนวณพารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์ได้
2. คำนวณพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ได้
3. คำนวณพารามิเตอร์ไฮบริดได้
4. คำนวณพารามิเตอร์การส่งผ่านได้
5. ประยุกต์ใช้สมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ได้
6. ประยุกต์ใช้สมการเพื่อการเชื่อมต่อของสองพอร์ตแบบขนาน อนุกรม และคาสเคดได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

12.1 **พารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์** (Admittance Parameters)

กล่าวได้ว่าวงจรข่ายเชิงเส้นดังรูปที่ 12.1 ก) นั้นเป็นพอร์ตเดียว ซึ่งเป็นการนำขั้วมาเข้าคู่ของขั้ว A–B ประกอบเป็นพอร์ต สามารถแสดงเป็นองค์ประกอบเดียว อย่างเช่น R, L และ C หรือควรจะเชื่อมต่อด้วยองค์– ประกอบเหล่านี้ วงจรข่ายเชิงเส้นดังรูปที่ 12.1 ข) เรียกว่า สองพอร์ต ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานว่า ขั้ว A–B เป็นพอร์ตอินพุตและขั้ว C–D เป็นพอร์ตเอาต์พุต



ก) วงจรข่ายพอร์ตเดียว ข) วงจรข่ายสองพอร์ต

รูปที่ 12.1 วงจรข่ายเชิงเส้น

12.2 **พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์** (Impedance Parameters)

ถ้าสมมติให้ว่าวงจรข่ายสองพอร์ตเป็นวงจรข่ายเชิงเส้นที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิสระ เมื่อใช้ทฤษฎีบทการซ้อนทับ เราจะเขียนแรงดันอินพุตและเอาต์พุต ตามผลรวมของสองส่วนพร้อมด้วย I_1 และ I_2 ได้เป็น

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \qquad \text{..... 12.4}$$

สมการเหล่านี้ใช้อธิบายวงจรข่ายสองพอร์ต และเขียนในรูปเมตริกซ์ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

เช่นเดียวกันกับพารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์ ซึ่งพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ (เรียกง่าย ๆ ว่า พารามิเตอร์เซด: Z parameters) และพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 12.4 ได้เป็น

$$z_{11} = \left.\frac{V_1}{I_1}\right|_{I_2=0} \quad ; \quad z_{12} = \left.\frac{V_1}{I_2}\right|_{I_1=0}$$

$$z_{21} = \left.\frac{V_2}{I_1}\right|_{I_2=0} \quad ; \quad z_{22} = \left.\frac{V_2}{I_2}\right|_{I_1=0} \qquad \text{..... 12.5}$$

12.3 **พารามิเตอร์ไฮบริด** (Hybrid Parameters)

ภายใต้ข้อสมมติฐานเพื่อการพัฒนาพารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์และพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ขึ้นมาใช้แก้ ปัญหากรณีที่ทั้งคู่อาจไม่มีอยู่ในวงจรข่ายสองพอร์ตจึงพัฒนาพารามิเตอร์ชุดอื่นขึ้นมาใช้ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการกำหนดให้ V_1 และ I_1 เป็นตัวแปรอิสระ จึงเรียกว่า พารามิเตอร์ไฮบริด ดังนั้นสมการสองพอร์ตในเทอมของพารามิเตอร์ไฮบริด (ในตำราอื่นอาจเรียกว่า พารามิเตอร์ผสมผสาน หรือพารามิเตอร์สัญญาณผสม) ได้เป็น

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \qquad \text{..... 12.6}$$

สมการนี้ใช้อธิบายวงจรข่ายสองพอร์ต และเขียนในรูปเมตริกซ์ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \qquad \text{..... 12.7}$$

12.4 **พารามิเตอร์การส่งผ่าน** (Transmission Parameters)

เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดว่าการวิเคราะห์แรงดันและกระแสที่ขั้วต่อใด ๆ นั้นควรเป็นอิสระต่อกันหรือขึ้นต่อกัน จึงสร้างพารามิเตอร์หลายชุดเพื่อแก้ปัญหา และมีพารามิเตอร์ชุดหนึ่งซึ่งเป็นชุดสุดท้ายที่ตัวแปรต่าง ๆ ที่พอร์ตอินพุตมีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรต่าง ๆ ที่พอร์ตเอาต์พุต อธิบายด้วยสมการ

$$V_1 = AV_2 - BI_2$$

$$I_1 = CV_2 - DI_2 \qquad \text{..... 12.9}$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ ได้เป็น

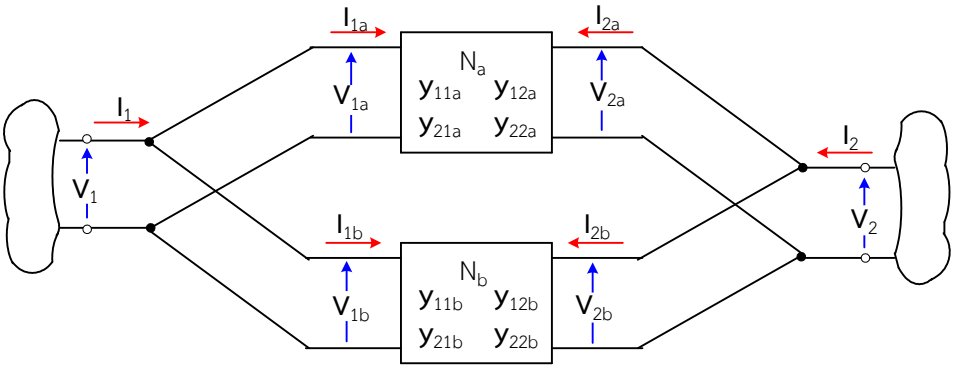
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \qquad \text{..... 12.10}$$

12.5 **ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์** (Relationships between Parameters)

	Z	Y	h	T
Z	$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{y_{11}}{\Delta y} & \frac{-y_{12}}{\Delta y} \\ \frac{-y_{21}}{\Delta y} & \frac{y_{11}}{\Delta y} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta h}{h_{22}} & \frac{h_{12}}{h_{22}} \\ \frac{-h_{21}}{h_{22}} & \frac{1}{h_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A}{C} & \frac{\Delta T}{C} \\ \frac{1}{C} & \frac{D}{C} \end{bmatrix}$
Y	$\begin{bmatrix} \frac{z_{22}}{\Delta z} & \frac{-z_{12}}{\Delta z} \\ \frac{-z_{21}}{\Delta z} & \frac{z_{11}}{\Delta z} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{h_{11}} & \frac{-h_{12}}{h_{11}} \\ \frac{h_{21}}{h_{11}} & \frac{\Delta h}{h_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{D}{B} & \frac{-\Delta T}{B} \\ \frac{-1}{B} & \frac{A}{B} \end{bmatrix}$
h	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta z}{z_{22}} & \frac{z_{12}}{z_{22}} \\ \frac{-z_{21}}{z_{22}} & \frac{1}{z_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{y_{11}} & \frac{-y_{12}}{y_{11}} \\ \frac{y_{21}}{y_{11}} & \frac{\Delta y}{y_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B}{D} & \frac{\Delta T}{D} \\ \frac{-1}{D} & \frac{C}{D} \end{bmatrix}$
T	$\begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{z_{21}} & \frac{\Delta z}{z_{21}} \\ \frac{1}{z_{21}} & \frac{z_{22}}{z_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{-y_{22}}{y_{21}} & \frac{-1}{y_{21}} \\ \frac{-\Delta y}{y_{21}} & \frac{-y_{11}}{y_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{-\Delta h}{h_{21}} & \frac{-h_{11}}{h_{21}} \\ \frac{-h_{22}}{h_{21}} & \frac{-1}{h_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$

12.6 **การเชื่อมต่อของสองพอร์ต** (Interconnection of Two–Ports)

การต่อวงจรสองพอร์ตขนาดใหญ่และซับซ้อนอาจแบ่งออกเป็นวงจรข่ายย่อยได้และการเชื่อมต่อวงจรมีความสำคัญเพราะเมื่อออกแบบระบบที่ซับซ้อนจะต้องทำให้ง่ายรวมทั้งจำนวนระบบย่อยที่จะสามารถให้การเชื่อมต่อเป็นระบบที่สมบูรณ์ได้ ดังนั้นเทคนิคสำหรับปฏิบัติเกี่ยวกับวงจรข่ายโดยการรวมของวงจรข่ายย่อย ๆ และแสดงการเชื่อมต่อเพียงสามชนิดคือ ขนาน อนุกรม และคาสเคด



รูปที่ 12.5 การเชื่อมต่อขนานของวงจรข่ายสองพอร์ตสองวงจร

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 16/18, คาบที่ 76–80/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 12
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักเรียนเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 12

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 12, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน แบบฝึกหัด
2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับวงจรสองพอร์ต, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 12	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 12	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดของที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม	ตรวจจากโปรแกรม เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 12	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์
2. ให้ทำจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจรให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์
3. ทบทวนเนื้อหาเพื่อเตรียมสอบปลายภาค ในสัปดาห์ที่ 18

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 12
2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจร
3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 12
4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน

	แผนการจัดการเรียนรู้ที่ 13	**หน่วยที่** 13
	ชื่อวิชา การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัสวิชา 30105-1001	เวลาเรียนรวม 90 คาบ
	ชื่อหน่วย วงจรหม้อแปลง วงจรคัปเปิล และฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า	สอนครั้งที่ 17/18
ชื่อเรื่อง วงจรหม้อแปลง วงจรคัปเปิล และฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า		จำนวน 5 คาบ

หัวข้อเรื่อง /// (Topics)

13.1 บทนำ

13.2 หม้อแปลงอุดมคติ

13.3 อิมพีแดนซ์สะท้อน

13.4 พิกัดหม้อแปลงกำลัง

13.5 การประยุกต์ใช้หม้อแปลง

13.6 หม้อแปลงแกนเหล็กในทางปฏิบัติ

13.7 ผลกระทบแรงดันและความถี่

13.8 วงจรเชื่อมต่ออย่างหลวม

13.9 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

13.10 สรุปสาระสำคัญ

แนวคิดสำคัญ /// (Main Idea)

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับและทำงานด้วยสนามแม่เหล็ก วงจรหม้อแปลงนี้เพื่อศึกษาแรงดัน กระแส กำลังทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิรวมทั้งอัตราส่วนแรงดัน อัตราส่วนกระแสที่คำนวณจากอัตราส่วนจำนวนรอบ ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ในหม้อแปลง รวมทั้งความเหนี่ยวนำร่วมและใช้เป็นพื้นฐานของวงจรเชื่อมต่อเรียกอีกอย่างว่าวงจรคัปเปิล (coupled circuits)

สมรรถนะย่อย /// (Element of Competency)

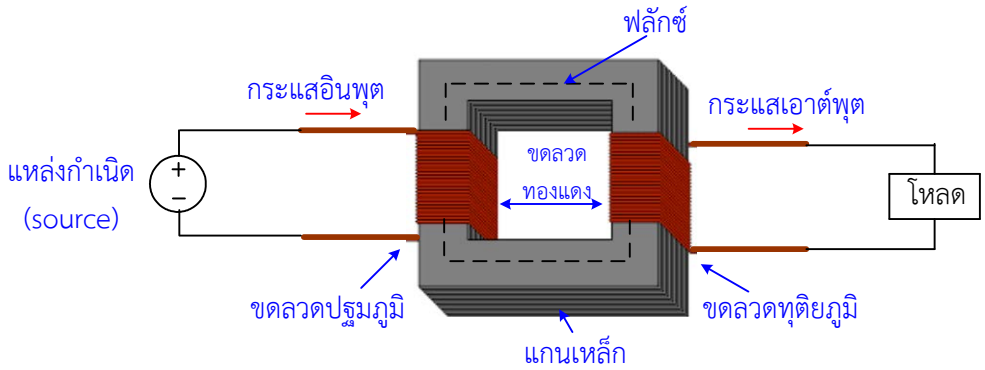
แสดงความรู้เกี่ยวกับวงจรหม้อแปลง วงจรคัปเปิล และฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม /// (Behavioral Objectives)

1. อธิบายโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงได้
2. หาค่าอัตราส่วนแรงดันและอัตราส่วนกระแสจากอัตราส่วนจำนวนรอบได้
3. คำนวณอิมพีแดนซ์สะท้อนได้
4. คำนวณพิกัดของหม้อแปลงกำลังได้
5. ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้หม้อแปลงได้
6. คำนวณแรงดันและกระแสในวงจรหม้อแปลงได้
7. อธิบายผลกระทบของแรงดันและความถี่ในหม้อแปลงได้
8. คำนวณแรงดันและกระแสในวงจรเชื่อมต่ออย่างหลวมได้
9. อธิบายความหมายและผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้

เนื้อหาสาระ /// (Content)

13.1 บทนำ



13.1.1 โครงสร้างหม้อแปลง (Transformer Construction)

13.1.2 ทิศทางขดลวด (Winding Directions)

13.2 หม้อแปลงอุดมคติ

13.2.1 อัตราส่วนแรงดัน (Voltage Ratio)

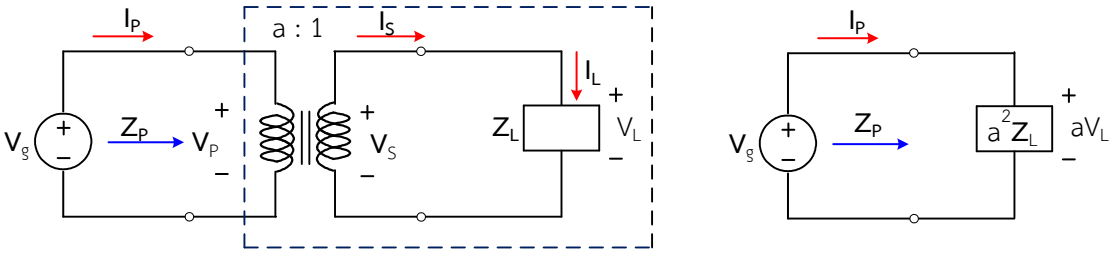
13.2.2 หม้อแปลงเพิ่มแรงดันและหม้อแปลงลดแรงดัน

13.2.3 อัตราส่วนกระแส (Current Ratio)

13.2.4 สภาพขั้วของแรงดันเหนี่ยวนำ: เครื่องหมายดอท

13.2.5 การวิเคราะห์วงจรหม้อแปลงอย่างง่าย

13.3 อิมพีแดนซ์สะท้อน

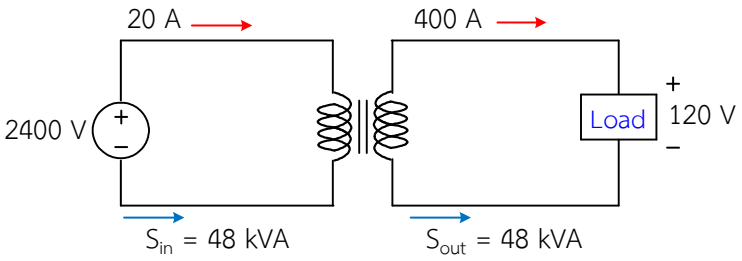


ก) วงจรใช้งานจริง ข) อิมพีแดนซ์สะท้อน $Z_P = a^2Z_L$

รูปที่ 13.10 แนวคิดของอิมพีแดนซ์สะท้อน จากขั้วปฐมภูมิมองไปถึง Z_L เหมือนกันกับอิมพีแดนซ์ของ a^2Z_L ซึ่งมีแรงดัน aV_L ตกคร่อมมันและมีกระแส I_L/a ไหลผ่านตัวมัน

13.4 พิกัดหม้อแปลงกำลัง

หม้อแปลงกำลังคือ พิกัดในเทอมของแรงดันและกำลังไฟฟ้าปรากฏ (apparent power: S) (สำหรับหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงในหน่วยที่ 9) พิกัดกระแสสามารถหาจากพิกัดนี้ อย่างเช่น พิกัดหม้อแปลง 2400/120 V, 48 kVA มีพิกัดกระแสบนด้าน 2400 V คือ 48000 VA/2400 V = 20 A และพิกัดกระแสบนด้าน 120 V คือ 48000 VA/120 V = 400 A ดูรูปที่ 13.12 หม้อแปลงนี้สามารถจ่ายโหลดได้ถึง 48 kVA ถ้าไม่คำนึงถึงตัว–ประกอบกำลัง (power factor)



13.5 การประยุกต์ใช้หม้อแปลง

อย่างเช่น ใช้หม้อแปลงเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply) ใช้หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แยกส่วนวงจรไฟฟ้า (Isolation) ใช้หม้อแปลงเป็นตัวเทียบคู่อิมพีแดนซ์ (matching) ซึ่งเป็นภาคเอาต์พุต

ของเครื่องขยายเสียง ใช้หม้อแปลงในระบบกำลัง (power system) ใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดทุติยภูมิหลายขด (transformer with multiple secondaries) และหม้อแปลงออโต (autotransformers) เหล่านี้จัดเป็นการประยุกต์ใช้หม้อแปลงทั้งสิ้น

13.6 หม้อแปลงแกนเหล็กในทางปฏิบัติ

13.6.1 ฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux)

13.6.2 ความต้านทานขดลวด (Winding Resistance)

13.6.3 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

13.6.4 การคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulation)

13.6.5 ประสิทธิภาพหม้อแปลง (Transformer Efficiency)

13.7 ผลกระทบแรงดันและความถี่

13.7.1 ผลกระทบของแรงดัน (Effect of Voltage)

13.7.2 ผลกระทบของความถี่ (Effect of Frequency)

13.8 วงจรเชื่อมต่ออย่างหลวม

13.8.1 แรงดันในขดลวดแกนอากาศ (Voltage in Air-Core Coils)

13.8.2 แรงดันร่วม (Mutual Voltage)

13.8.3 การบวกและลบแรงดัน (Additive and Subtractive Voltages)

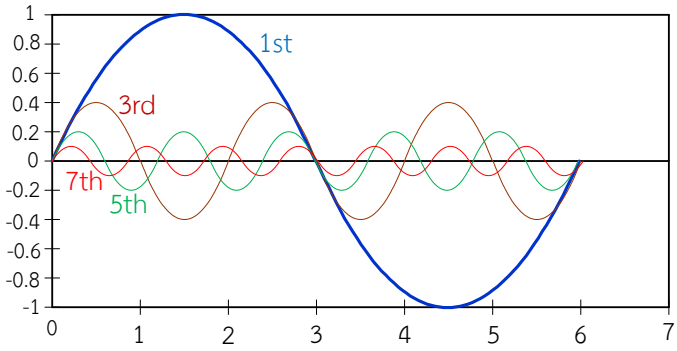
13.8.4 กฎของดอท (The Dot Rule)

13.8.5 สัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อ (Coefficient of Coupling: k)

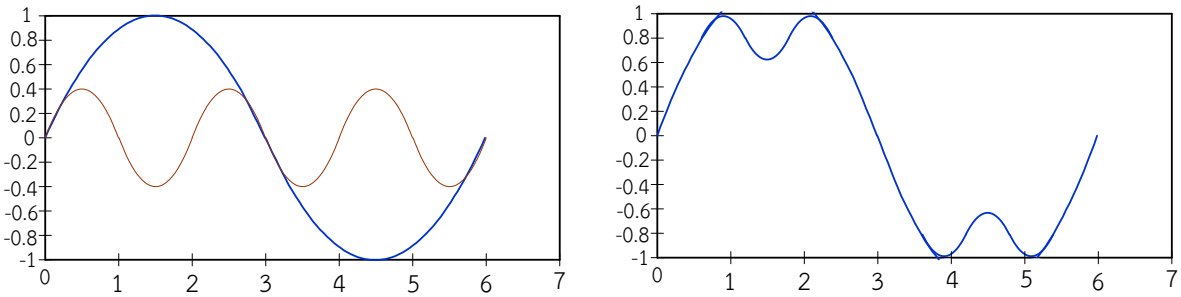
13.8.6 ตัวเหนี่ยวนำที่มีการเชื่อมต่อร่วม (Inductors with Mutual Coupling)

13.9 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ฮาร์มอนิก (Harmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณไซน์ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (ในประเทศไทยมีค่า 50 Hz) เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่ 150 Hz และฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่ 250 Hz เป็นต้น ดังรูปที่ 13.26 และผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกับสัญญาณความถี่มูลฐานทั้งขนาด (amplitude) และมุมเฟส (phase angle) แล้วทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดและรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 13.27



รูปที่ 13.26 ตัวอย่างฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7 เทียบกับความถี่มูลฐานที่ 50 Hz



ก) รูปคลื่นไซน์และฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่เกิด ข) การรวมสัญญาณทั้งสองทำให้รูปคลื่นไซน์มูลฐานเพี้ยน

รูปที่ 13.27 การเกิดฮาร์มอนิกทำให้สัญญาณรูปคลื่นไซน์เพี้ยน

กิจกรรมการเรียนรู้ (สัปดาห์ที่ 17/18, คาบที่ 81–85/90)

1. ครูทบทวนเนื้อหาการสอนโดยย่อ
2. นักศึกษาทำแบบทดสอบก่อนเรียนหน่วยที่ 13
3. ครูนำเข้าสู่บทเรียน และครูแจ้งจุดประสงค์การเรียน
4. ครูสอนเนื้อหาสาระ
5. นักศึกษาทำแบบฝึกหัดเป็นกลุ่มละ 1 ข้อ ขณะนักศึกษาทำแบบฝึกหัดครูจะสังเกตการทำงาน
6. ครูและนักศึกษาร่วมกันเฉลยแบบฝึกหัดบางข้อ
7. แบ่งกลุ่มนักเรียนเป็นกลุ่มๆ ละ 3-4 คน ทำการจำลองโปรแกรม
8. ครูและนักศึกษาร่วมกันสรุปเรื่องที่เรียน
9. นักศึกษาทำแบบทดสอบหลังเรียนหน่วยที่ 13

สื่อและแหล่งการเรียนรู้

1. สื่อการเรียนรู้ หนังสือเรียน หน่วยที่ 13, PowerPoint ประกอบการสอนและแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน แบบฝึกหัด

2. แหล่งการเรียนรู้ หนังสือ วารสารเกี่ยวกับฮาร์มอนิก, อินเทอร์เน็ต www.google.com

การวัดและการประเมินผล

การวัดผล (ใช้เครื่องมือ)	**การประเมินผล** (นำผลเทียบกับเกณฑ์และแปลความหมาย)
1. แบบทดสอบก่อนเรียน (Pre–test) หน่วยที่ 13	(ไว้เปรียบเทียบกับคะแนนสอบหลังเรียน)
2. แบบฝึกหัดหน่วยที่ 13	ตรวจแบบฝึกหัด เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบฝึกหัดของที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม	ตรวจจากโปรแกรม เกณฑ์ผ่าน 50%
3. แบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 13	ตรวจแบบทดสอบ เกณฑ์ผ่าน 50%
4. แบบประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์	ตรวจตามแบบประเมินผล เกณฑ์ผ่าน 60%

งานที่มอบหมาย

งานที่มอบหมายนอกเหนือเวลาเรียน

1. ให้ทำแบบฝึกหัดให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

2. ให้ทำจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจรให้เรียบร้อย ถูกต้อง สมบูรณ์

3. ทบทวนเนื้อหาเพื่อเตรียมสอบปลายภาค ในสัปดาห์ที่ 18

ผลงาน/ชิ้นงาน/ความสำเร็จของผู้เรียน

1. ผลการทำและนำเสนอแบบฝึกหัดหน่วยที่ 12

2. ผลการทำและนำเสนอการจำลองโปรแกรมการทำงานของวงจร

3. ผลคะแนนจากแบบทดสอบหลังเรียน (Post–test) หน่วยที่ 12

4. ผลคะแนนจากการประเมินคุณธรรม จริยธรรม ที่พึงประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. ธำรงศักดิ์ หมินก้าหรีม. **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รหัส 30105-1001**. (2563). นนทบุรี: เมืองไทย.

บันทึกหลังการสอน

1. **ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้** (จุดประสงค์การเรียนรู้/กิจกรรม/การประเมินผล)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. **ผลการเรียนของนักเรียน/ผลการสอนของครู/ปัญหาที่พบ**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. **แนวทางการแก้ปัญหา**

.....

.....

.....

.....

.....

ลงชื่อ..... ลงชื่อ.....

(.....) (.....)

ตัวแทนนักศึกษา ครูผู้สอน