หน่วยที่ 6 วงจรไฟฟ้าแบบผสม (Combination Circuit)

สาระสำคัญ

วงจรไฟฟ้าแบบผสม หมายถึง การนำความต้านทานตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไปมาต่อร่วมกันทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน มารวมกันไว้ในวงจรเดียวกันและนำไปต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า การวิเคราะห์วงจรจะใช้หลักการของวงจรไฟฟ้าอนุกรมและหลักการของวงจรไฟฟ้าขนาน ควบคู่กันไปตามลักษณะของวงจร

สาระการเรียนรู้

6.1 ความหมายของวงจรไฟฟ้าแบบผสม

6.2 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าแบบผสม

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

เพื่อให้นักเรียนมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าต่อแบบผสม การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความต้านทานและกำลังไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าแบบผสม

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

ด้านความรู้ (ทฤษฎี)

1. บอกความหมายของวงจรไฟฟ้าแบบผสมได้
2. คำนวณหาค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้าแบบผสมได้
3. คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าแบบผสมได้
4. คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าแบบผสมได้
5. คำนวณหากำลังไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าแบบผสมได้

ด้านคุณธรรม จริยธรรม

1. คุณลักษณะอันพึงประสงค์

1.1 ความรับผิดชอบ

1.2 ความมีวินัย

1.3 การตรงต่อเวลา

1.4 ความมีมนุษย์สัมพันธ์

1.5 ความรู้และทักษะวิชาชีพ

1.6 ความสนใจใฝ่หาความรู้

2. การบูรณาการปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

2.1 ศึกษาข้อมูลอย่างเป็นระบบ

2.2 การมีส่วนร่วม

2.3 ความผูกพัน

2.4 รู้ รัก สามัคคี

ในหน่วยนี้จะกล่าวถึงวงจรไฟฟ้าแบบผสม เป็นวงจรที่มีลักษณะการต่อทั้งวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมและวงจรไฟฟ้าแบบขนานในวงจรเดียวกัน การแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าแบบผสมเราจำเป็นเข้าใจคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมและคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้าแบบขนานครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว เราก็สามารถวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าแบบผสมได้ เช่นกัน

6.1 ความหมายของวงจรไฟฟ้าแบบผสม

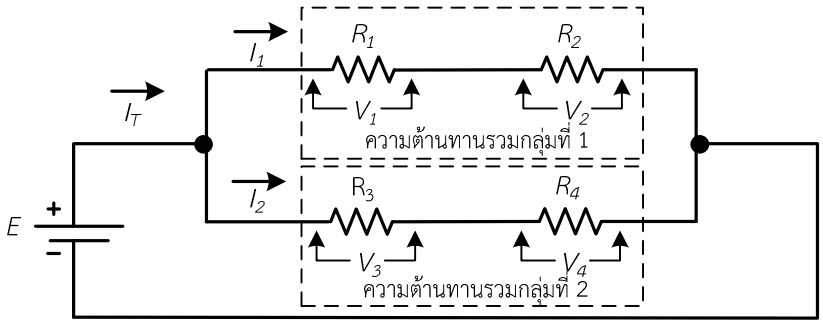
วงจรไฟฟ้าแบบผสม หมายถึง การต่อวงจรไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการต่อรวมกันระหว่างวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมกับวงจรไฟฟ้าแบบขนาน ภายในวงจรโหลดบางตัวต่อวงจรแบบอนุกรม และภายในวงจรโหลดบางตัวต่อวงจรแบบขนาน การต่อวงจรไฟฟ้าแบบผสมนี้ไม่มีมาตรฐานตายตัว เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการต่อวงจรตามต้องการ การวิเคราะห์แก้ปัญหาของวงจรผสม ต้องอาศัยหลักการคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมและวงจรไฟฟ้าแบบขนาน

ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าแบบผสม มีดังนี้

1. หาค่าความต้านทานรวมของวงจรทีละส่วน โดยเขียนวงจรใหม่ให้ง่ายในการพิจารณายุบวงจรจนถึงส่วนสุดท้าย
2. การพิจารณายุบส่วนวงจร ต้องพิจารณาจากด้านในสุดออกมา
3. หาค่ากระแสไฟฟ้ารวมของวงจร โดยคำนวณด้วยกฎของโอห์ม
4. หาค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรแต่ละส่วน พร้อมทั้งหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในส่วนนั้น

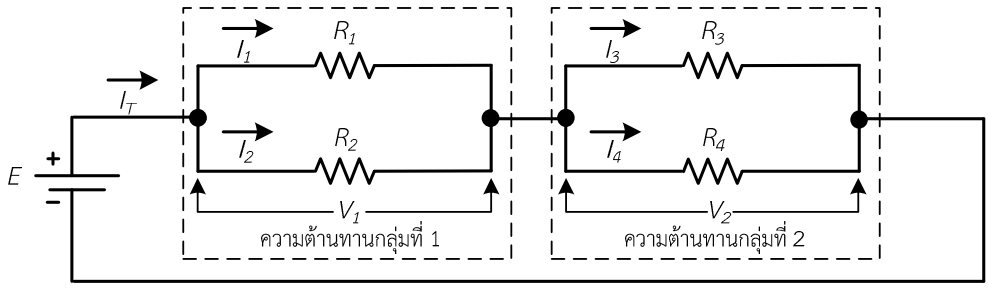
วงจรไฟฟ้าแบบผสม มีการต่อวงจรแบ่งได้ 2 แบบ คือ

6.1.1 วงจรไฟฟ้าแบบผสม อนุกรม-ขนาน คือ วงจรที่มีความต้านทานในแต่ละกลุ่มต่อแบบอนุกรมกัน แล้วนำความต้านทานในแต่ละกลุ่มมาต่อกันแบบขนานอีกที่หนึ่ง ดังรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าความต้านทานในกลุ่มที่หนึ่งประกอบด้วยความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่ออนุกรมกัน ส่วนความต้านทานในกลุ่มที่สอง ประกอบด้วยความต้านทาน R_3 และ R_4 ต่ออนุกรมกัน แล้วนำความต้านทานรวมในกลุ่มที่หนึ่งกับกลุ่มที่สองมาต่อกันแบบขนานอีกที่หนึ่ง



รูปที่ 6.3 วงจรไฟฟ้าแบบผสม อนุกรม – ขนาน

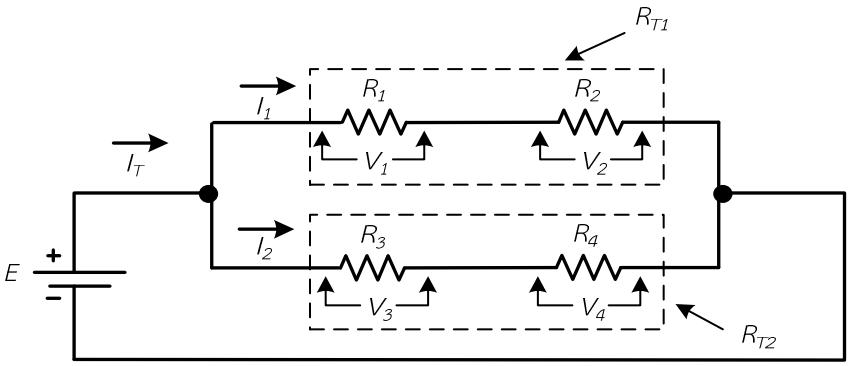
6.1.2 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ขนาน- อนุกรม คือวงจรที่มีความต้านทานในแต่ละกลุ่มต่อแบบขนานกัน แล้วนำความต้านทานในแต่ละกลุ่มมาต่อกันแบบอนุกรมอีกที่หนึ่ง ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าความต้านทานในกลุ่มที่หนึ่งประกอบด้วยความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่อขนานกัน ส่วนความต้านทานในกลุ่มที่สอง ประกอบด้วยความต้านทาน R_3 และR_4 ต่อขนานกัน แล้วนำความต้านทานในกลุ่มที่หนึ่งกับกลุ่มที่สองมาต่อกันแบบอนุกรมอีกที่หนึ่ง



รูปที่ 6.4 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ขนาน - อนุกรม

6.2 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าแบบผสม

6.2.1 วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบอนุกรม-ขนาน



รูปที่ 6.5 วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบอนุกรม – ขนาน 2 สาขา

จากรูปที่ 6.5 พิจารณาได้ว่า ค่าความต้านรวมกลุ่มที่หนึ่ง (R_{T1}) ประกอบด้วยต้นของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่หนึ่ง หรือ R_1 ต่อเข้ากับต้นของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่สาม หรือ R_3 กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขั้วบวก (+) ส่วนปลายของตัวต้านทานตัวที่หนึ่งต่อเข้ากับต้นของตัวต้านทานตัวที่สอง หรือ R_2 ต่อแบบอนุกรม ปลายของตัวต้านทานตัวที่สองต่อเข้ากับปลายของตัวต้านทาน ตัวที่สี่ หรือ R_4 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขั้วลบ (-) ครบ วงจรที่ขั้วลบ (-) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ค่าความต้านรวมกลุ่มที่สอง (R_{T2}) ประกอบด้วยต้นของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่สามหรือ R_3 ต่อเข้ากับต้นของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่หนึ่ง หรือ R_1 กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขั้วบวก (+) เช่นกันส่วนปลายของตัวต้านทานตัวที่สามต่อเข้ากับต้นของตัวต้านทานตัวที่สี่ หรือ R_4 ต่อแบบอนุกรม ปลายของตัวต้านทานตัวที่สี่ต่อเข้ากับปลายของตัวต้านทานตัวที่สอง หรือ R_2 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขั้วลบ (-) ครบ วงจรที่ขั้วลบ (-) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เช่นกัน จากนั้นจึงนำค่าความต้านทานรวมกลุ่มที่หนึ่ง (R_{T1}) กับความต้านทานรวมกลุ่มที่สอง (R_{T2}) เป็นวงจรไฟฟ้าแบบขนาน ในการหาค่ากระแสไฟฟ้า (Current) และแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ให้หาค่าในวงจรโดยใช้ลักษณะและวิธีการเดียวกันกับวงจรวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม วงจรไฟฟ้าแบบขนานที่ผ่านมา โดยให้หาค่าต่างๆ ในวงจรย่อยในแต่ละกลุ่มก่อน จากนั้นจึงหาค่าต่าง ๆ ในวงจรรวม ก็จะได้ค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

จากวงจรไฟฟ้า รูปที่ 6.5 สูตรการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การหาค่าความต้านทานรวม โดยคำนวณหาค่าความต้านทานรวมในส่วนที่ต่ออนุกรมกันก่อนแล้วจึงนำมาขนานกัน

$$R_{T1} = R_1 + R_2 \quad \text{.....(6-1)}$$

$$R_{T2} = R_3 + R_4 \quad \text{.....(6-2)}$$

$$R_T = \frac{R_{T_1} \times R_{T_2}}{R_{T_1} + R_{T_2}} \quad \text{.....(6-3)}$$

2. การหากระแสไฟฟ้าในวงจร

$$I_1 = \frac{E}{R_{T_1}} \quad \text{(กระแสไฟฟ้า } I_1 \text{ไหลผ่าน } R_1 \text{และ} R_2\text{) .....(6-4)}$$

$$I_2 = \frac{E}{R_{T_2}} \quad \text{(กระแสไฟฟ้า } I_2 \text{ไหลผ่าน } R_3 \text{และ} R_4\text{) .....(6-5)}$$

$$I_T = I_1 + I_2 \quad \text{.....(6-6)}$$

หรือ $$I_T = \frac{E}{R_T} \quad \text{.....(6-7)}$$

3. การหาแรงดันไฟฟ้าในวงจร

$$V_1 = I_1 \times R_1 \quad \text{.....(6-8)}$$

$$V_2 = I_1 \times R_2 \quad \text{.....(6-9)}$$

$$V_3 = I_2 \times R_3 \quad \text{.....(6-10)}$$

$$V_4 = I_2 \times R_4 \quad \text{.....(6-11)}$$

4. การหากำลังไฟฟ้าในวงจร

$$P_1 = V_1 \times I_1 \quad \text{.....(6-12)}$$

$$P_2 = V_2 \times I_1 \quad \text{.....(6-13)}$$

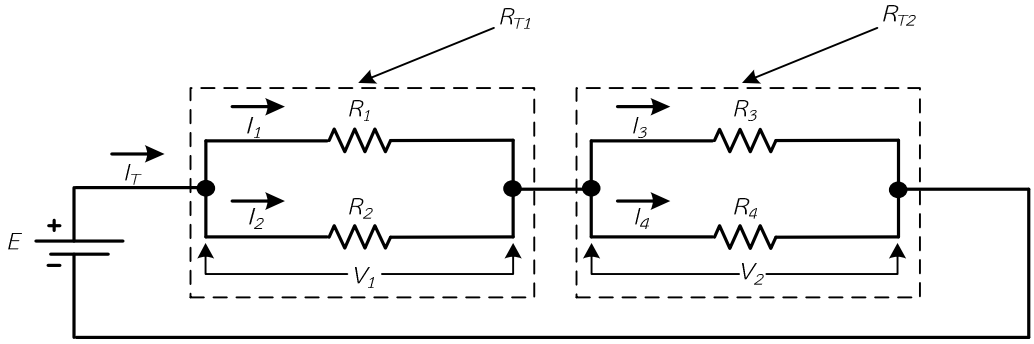
$$P_3 = V_3 \times I_2 \quad \text{.....(6-14)}$$

$$P_4 = V_4 \times I_2 \quad \text{.....(6-15)}$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad \text{.....(6-16)}$$

หรือ $P_T = E \times I_T$ ..... (6-17)

6.2.2 วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบขนาน- อนุกรม



รูปที่ 6.6วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบขนาน –อนุกรม 2 กลุ่ม

จากรูปที่ 6.6 พิจารณาได้ว่า ค่าความต้านรวมกลุ่มที่หนึ่ง (R_{T1}) ประกอบด้วยปลายข้างหนึ่งของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่หนึ่ง (R_1) และตัวที่สอง (R_2) ต่อเข้าที่จุดเดียวกัน ก็คือ ต่อเข้าทางด้านขั้วบวก (+) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและปลายอีกข้างหนึ่งของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่หนึ่ง (R_1) และตัวที่สอง (R_2) ต่อเข้าที่จุดเดียวกันกับ ปลายข้างหนึ่งของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวที่สาม(R_3) และตัวที่สี่ (R_4) ของค่าความต้านรวมกลุ่มที่สอง (R_{T2}) ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งของตัวต้านทาน (Resistor) (R_3) และตัวที่สี่ (R_4) ต่อเข้าที่จุดเดียวกัน ก็ต่อเข้าทางด้านขั้วลบ (-) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นจึงนำค่าความต้านทานรวมกลุ่มที่หนึ่ง (R_{T1}) กับความต้านทานรวมกลุ่มที่สอง (R_{T2})เป็นวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม ในการหาค่ากระแสไฟฟ้า (Current) และแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ให้หาค่าในวงจรโดยใช้ลักษณะและวิธีการเดียวกันกับวงจรวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม วงจรไฟฟ้าแบบขนานที่ผ่านมา โดยให้หาค่าต่างๆ ในวงจรย่อยในแต่ละกลุ่มก่อน จากนั้นจึงหาค่าต่าง ๆ ในวงจรรวม ก็จะได้ค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

จากวงจรไฟฟ้า รูปที่ 6.6 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การหาค่าความต้านทานรวมโดยคำนวณหาความต้านทานรวมในส่วนที่ต่อขนานกันก่อน แล้วจึงนำมาอนุกรมกัน

$$R_{T1} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{.....(6-18)}$$

$$R_{T2} = \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{.....(6-19)}$$

$$R_T = R_{T_1} + R_{T_2} \quad \text{.....(6-20)}$$

2. การหากระแสไฟฟ้ารวมในวงจร

$$I_T = \frac{E}{R_T} \quad \text{.....(6-21)}$$

3. การหาแรงดันไฟฟ้าในวงจร

V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม R_1 และ R_2 ดังนั้น

$$V_1 = I_T \times R_{T_1} \quad \text{..... (6-22)}$$

V_2 คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม R_3 และ R_4 ดังนั้น

$$V_2 = I_T \times R_{T_2} \quad \text{..... (6-23)}$$

4. การหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad \text{..... (6-24)}$$

$$I_2 = \frac{V_1}{R_2} \quad \text{..... (6-25)}$$

$$I_3 = \frac{V_2}{R_3} \quad \text{..... (6-26)}$$

$$I_4 = \frac{V_2}{R_4} \quad \text{..... (6-27)}$$

5. หากำลังไฟฟ้าในวงจร

$$P_1 = V_1 \times I_1 \quad \text{.....(6-28)}$$

$$P_2 = V_1 \times I_2 \quad \text{.....(6-29)}$$

$$P_3 = V_2 \times I_3 \quad \text{..... (6-30)}$$

$$P_4 = V_2 \times I_4 \quad \text{..... (6-31)}$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad \text{..... (6-32)}$$

หรือ $$P_T = E \times I_T \quad \text{..... (6-33)}$$

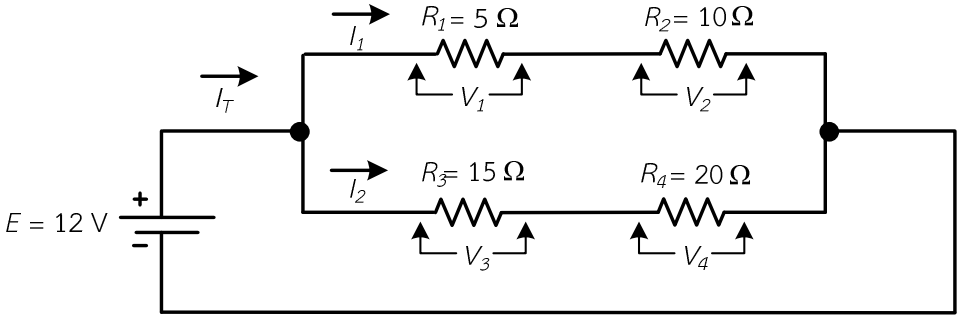
ตัวอย่างที่ 6.1 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.7 จงคำนวณหาค่า

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

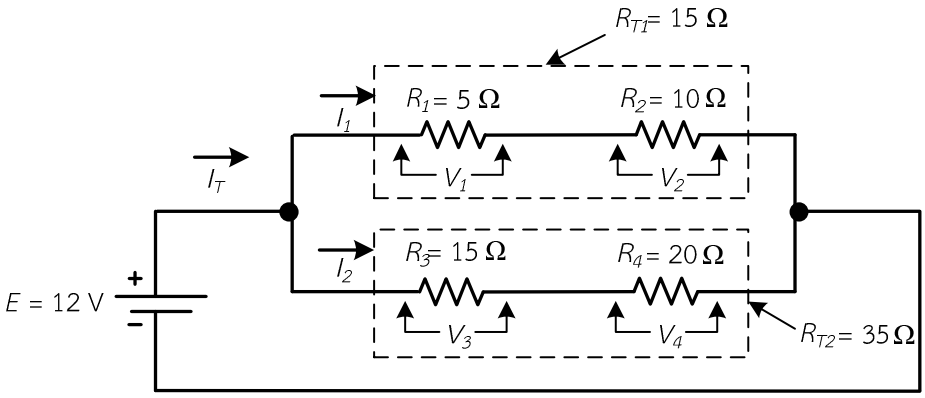
ข. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว และกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_1 , I_2 , I_T

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 , V_2 , V_3 ,V_4

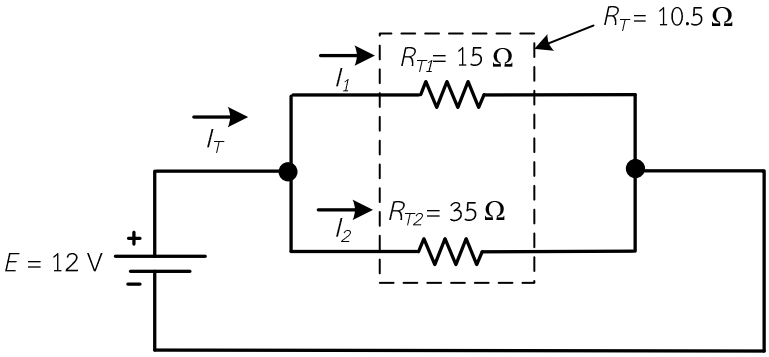
ง. กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานแต่ละตัวและกำลังไฟฟ้าของวงจร ; P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_T



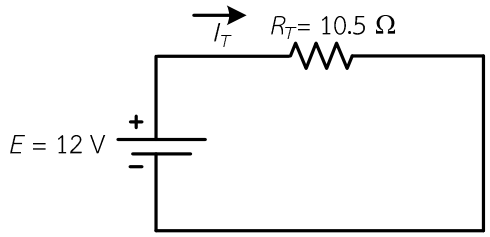
รูปที่ 6.7 วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบอนุกรม – ขนาน ตามตัวอย่างที่ 6.1



(ก) แสดงการจัดกลุ่มหา R_T ย่อย



(ข) แสดงการหาค่า R_{T1} และ R_{T2}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.8 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.1

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = R_1 + R_2$$
$$R_{T1} = 5\,\Omega + 10\,\Omega$$
$$R_{T1} = 15\ \Omega$$
$$R_{T2} = R_3 + R_4$$
$$R_{T2} = 15\,\Omega + 20\,\Omega$$
$$R_{T2} = 35\ \Omega$$
$$R_T = \frac{R_{T1} \times R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}}$$
$$R_T = \frac{15\,\Omega \times 35\,\Omega}{15\,\Omega + 35\,\Omega}$$
$$R_T = 10.5\ \Omega$$

∴ ความต้านทานรวมของวงจร = 10.5 โอห์ม <u>ตอบ</u>

ข.กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวและกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_1 ,I_2 , I_T

$$I_1 = \frac{E}{R_{T_1}}$$
$$I_1 = \frac{12\ \mathrm{V}}{15\ \Omega}$$
$$I_1 = 0.8\ \mathrm{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 , R_2 = 0.8 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

$$I_2 = \frac{E}{R_{T_2}}$$
$$I_2 = \frac{12\ \mathrm{V}}{35\ \Omega}$$
$$I_2 = 0.34\ \mathrm{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_3 , R_4 = 0.34 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

$$I_T = I_1 + I_2$$
$$I_T = 0.8\ \text{A} + 0.34\ \text{A}$$
$$I_T = 1.14\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร= 1.14 แอมแปร์ ตอบ

หรือ $$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_T = \frac{12\ \text{V}}{10.5\ \Omega}$$
$$I_T = 1.14\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร= 1.14 แอมแปร์ ตอบ

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานตัวแต่ละตัว ; V_1 , V_2 , V_3 ,V_4

$$V_1 = I_1 \times R_1$$
$$V_1 = 0.8\ \text{A} \times 5\ \Omega$$
$$V_1 = 4\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 = 4 โวลต์ ตอบ

$$V_2 = I_1 \times R_2$$
$$V_2 = 0.8\ \text{A} \times 10\ \Omega$$
$$V_2 = 8\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_2 = 8 โวลต์ ตอบ

$$V_3 = I_2 \times R_3$$
$$V_3 = 0.34\ \text{A} \times 15\ \Omega$$
$$V_3 = 5.1\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_3 = 5.1 โวลต์ ตอบ

$$V_4 = I_2 \times R_4$$
$$V_4 = 0.34\ \text{A} \times 20\ \Omega$$
$$V_4 = 6.9\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_4 = 6.9 โวลต์ ตอบ

ง. กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานตัวแต่ละตัวและกำลังไฟฟ้าของวงจร; P_1 , P_2, P_3, P_4 และ P_T

$$P_1 = V_1 \times I_1$$
$$P_1 = 4\ \text{V} \times 0.8\ \text{A}$$
$$P_1 = 3.2\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_1 = 3.2 วัตต์ ตอบ

$$P_2 = V_2 \times I_1$$
$$P_2 = 8\ \text{V} \times 0.8\ \text{A}$$
$$P_2 = 6.4\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_2 = 6.4 วัตต์ ตอบ

$$P_3 = V_3 \times I_2$$
$$P_3 = 5.1\ \text{V} \times 0.34\ \text{A}$$
$$P_3 = 1.73\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_3 = 1.73 วัตต์ ตอบ

$$P_4 = V_4 \times I_2$$
$$P_4 = 6.9\ \text{V} \times 0.34\ \text{A}$$
$$P_4 = 2.35\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_4 = 2.35 วัตต์ ตอบ

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$
$$P_T = 3.2\ \text{W} + 6.4\ \text{W} + 1.73\ \text{W} + 2.35\ \text{W}$$
$$P_T = 13.68\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้ารวมของวงจร = 13.68 วัตต์ ตอบ

หรือ $P_T = E \times I_T$
$$P_T = 12\ \text{V} \times 1.14\ \text{A}$$
$$P_T = 13.68\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้ารวมของวงจร = 13.68 วัตต์ ตอบ

ตัวอย่างที่ 6.2 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.9 จงคำนวณหาค่า

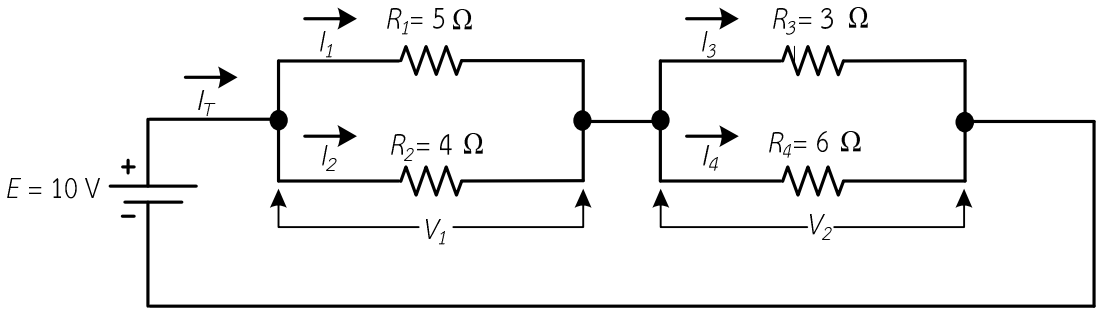
ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_T

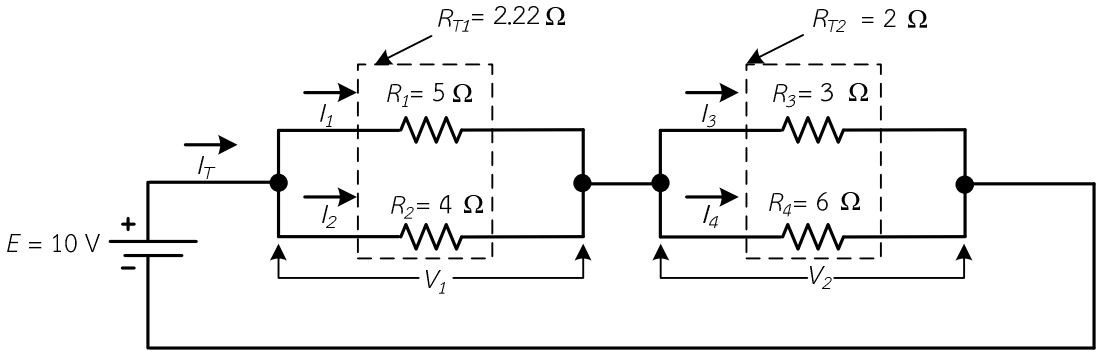
ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 , V_2

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1 ,I_2 ,I_3 ,I_4

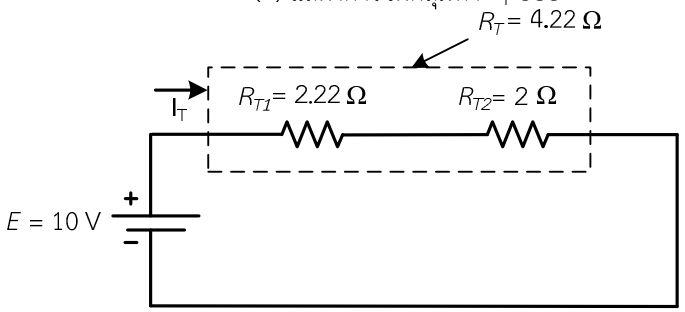
จ. กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานแต่ละตัวและกำลังไฟฟ้าของวงจร ; P_1 , P_2, P_3, P_4 , P_T



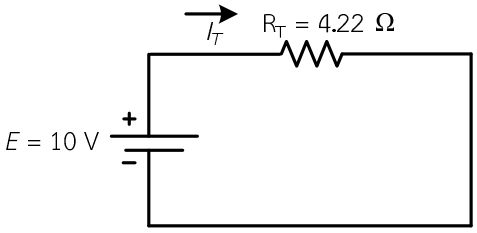
รูปที่ 6.9 วงจรไฟฟ้าแบบผสม แบบขนาน – อนุกรม ตามตัวอย่างที่ 6.2



(ก) แสดงการจัดกลุ่มหา R_T ย่อย



(ข) แสดงการหาค่า R_{T1} และ R_{T2}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.10 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.2

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{T1} = \frac{5\ \Omega \times 4\ \Omega}{5\ \Omega + 4\ \Omega}$$

$$R_{T1} = 2.22\ \Omega$$

$$R_{T2} = \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}$$

$$R_{T2} = \frac{3\ \Omega \times 6\ \Omega}{3\ \Omega + 6\ \Omega}$$

$$R_{T2} = 2\ \Omega$$

$$R_T = R_{T1} + R_{T2}$$

$$R_T = 2.22\,\Omega + 2\,\Omega$$

$$R_T = 4.22\,\Omega$$

$\therefore$ ความต้านทานรวมของวงจร = 4.22 โอห์ม ตอบ

ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_T

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_T = \frac{10\ \text{V}}{4.22\ \Omega}$$

$$I_T = 2.37\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร = 2.37 แอมแปร์ ตอบ

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 และ V_2

$$V_1 = I_T \times R_{T1}$$

$$V_1 = 2.37\ \text{A} \times 2.22\ \Omega$$

$$V_1 = 5.26\ \text{V}$$

$\therefore$ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 และ R_2 = 5.26 โวลต์ ตอบ

$$V_2 = I_T \times R_{T2}$$

$$V_2 = 2.37\ \text{A} \times 2\,\Omega$$

$$V_2 = 4.74\ \text{V}$$

$\therefore$ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_3 และ R_4 = 4.74 โวลต์ ตอบ

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1, I_2, I_3, I_4

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{5.26\ \text{V}}{5\ \Omega}$$

$$I_1 = 1.05\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 = 1.05 แอมแปร์ ตอบ

$$I_2 = \frac{V_1}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{5.26\ \text{V}}{4\ \Omega}$$

$$I_2 = 1.32\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_2 = 1.32 แอมแปร์ตอบ

$$I_3 = \frac{V_2}{R_3}$$

$$I_3 = \frac{4.74\ \mathbf{V}}{3\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_3 = 1.58\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_3 = 1.58 แอมแปร์ ตอบ

$$I_4 = \frac{V_2}{R_4}$$

$$I_4 = \frac{4.74\ \mathbf{V}}{6\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_4 = 0.79\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_4 = 0.79 แอมแปร์ ตอบ

จ. กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานแต่ละตัวและกำลังไฟฟ้าของวงจร ; P_1 , P_2, P_3, P_4และ P_T

$$P_1 = V_1 \times I_1$$

$$P_1 = 5.26\ \text{V} \times 1.05\ \text{A}$$

$$P_1 = 5.52\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_1 = 5.52 วัตต์ ตอบ

$$P_2 = V_2 \times I_1$$

$$P_2 = 5.26\ \text{V} \times 1.32\ \text{A}$$

$$P_2 = 6.94\text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_2 = 6.94 วัตต์ตอบ

$$P_3 = V_3 \times I_2$$

$$P_3 = 4.74\ \text{V} \times 1.58\ \text{A}$$

$$P_3 = 7.50\text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_3 = 7.50 วัตต์ตอบ

$$P_4 = V_4 \times I_2$$

$$P_4 = 4.74\ \text{V} \times 0.79\ \text{A}$$

$$P_4 = 3.74\text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน R_4 = 3.74 วัตต์ ตอบ

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_T = 5.52\ \text{W} + 6.94\ \text{W} + 7.50\ \text{W} + 3.74\ \text{W}$$

$$P_T = 23.70\ \text{W}$$

∴ กำลังไฟฟ้ารวมของวงจร = 23.70 วัตต์ ตอบ

หรือ $P_T = E \times I_T$

$P_T = 10\ V \times 2.37\ A$

$P_T = 23.70\ W$

∴ กำลังไฟฟ้ารวมของวงจร = 23.70 วัตต์ ตอบ

ตัวอย่างที่ 6.3 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.11จงคำนวณหาค่า

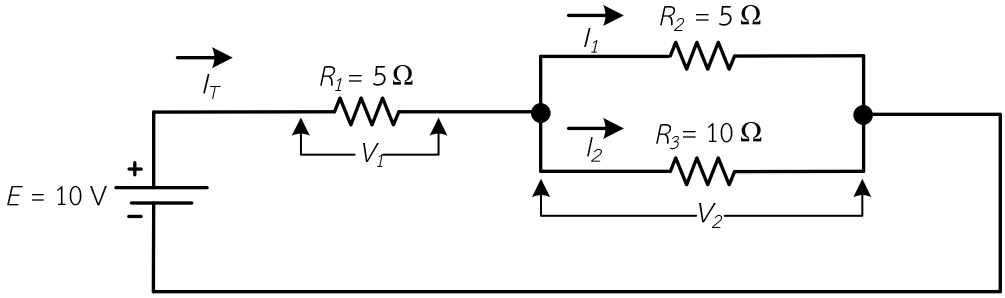
ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_T

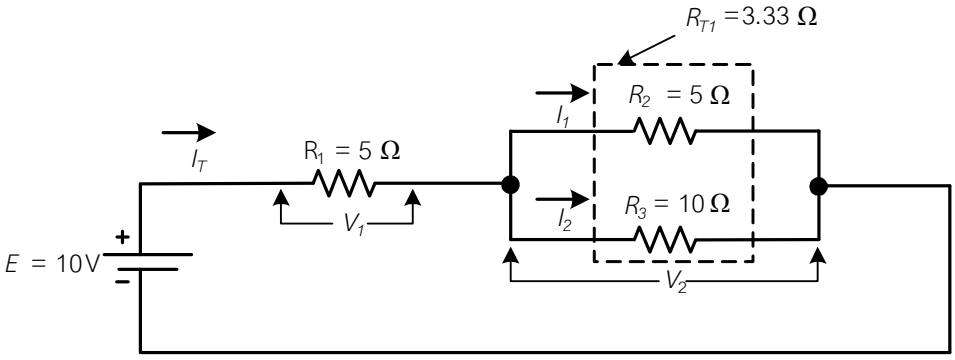
ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 , V_2

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1 ,I_2

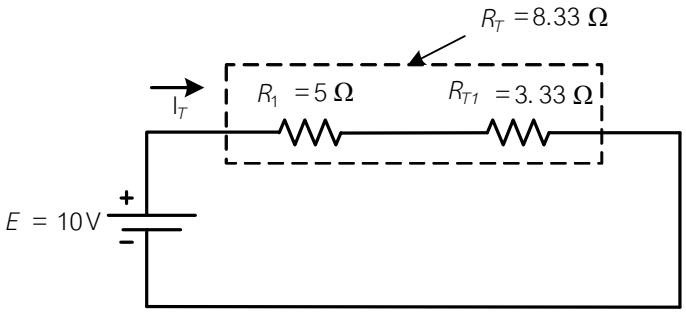
จ. กำลังไฟฟ้าของวงจร ; P_T



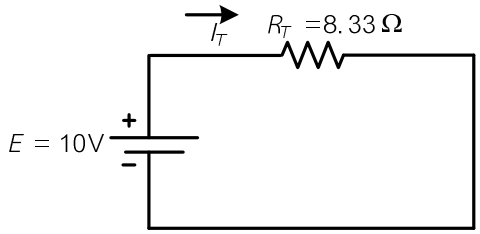
รูปที่ 6.11 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ตามตัวอย่างที่ 6.3



(ก) แสดงการหาค่า R_{T1}



(ข) แสดงการหารวมค่า R_1 และ R_{T2}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.12 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.3

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{T1} = \frac{5\,\Omega \times 10\,\Omega}{5\,\Omega + 10\,\Omega}$$

$$R_{T1} = 3.33\,\Omega$$

$$R_T = R_1 + R_{T1}$$

$$R_T = 5\,\Omega + 3.33\,\Omega$$

$$R_T = 8.33\,\Omega$$

$\therefore$ ความต้านทานรวมของวงจร =8.33 โอห์ม <u>ตอบ</u>

ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร; I_T

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_T = \frac{10\ \mathrm{V}}{8.33\ \Omega}$$

$$I_T = 1.2\ \mathrm{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร= 1.2 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1และ V_2

$$V_1 = I_T \times R_1$$

$$V_1 = 1.2\ \mathrm{A} \times 5\,\Omega$$

$$V_1 = 6\mathrm{V}$$

$\therefore$ แรงดันตกคร่อมค่าตัวต้านทาน R_1 = 6 โวลต์ <u>ตอบ</u>

$$V_2 = I_T \times R_{T1}$$

$$V_2 = 1.2\ \mathrm{A} \times 3.33\ \Omega$$

$$V_2 = 4\mathrm{V}$$

$\therefore$ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_2 และ R_3 = 4โวลต์ <u>ตอบ</u>

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1 ,I_2

$$I_1 = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_1 = \frac{4\ \mathbf{V}}{5\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_1 = 0.8\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_2 = 0.8 แอมแปร์ ตอบ

$$I_2 = \frac{V_2}{R_3}$$

$$I_2 = \frac{4\ \mathbf{V}}{10\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_2 = 0.4\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_3 = 0. 4 แอมแปร์ ตอบ

จ. กำลังไฟฟ้าของวงจร; P_T

$$P_T = E \times I_T$$

$$P_T = 10\ \text{V} \times 1.2\ \text{A}$$

$$P_T = 12\ \text{W}$$

$\therefore$ กำลังไฟฟ้ารวมของวงจร = 12 วัตต์ ตอบ

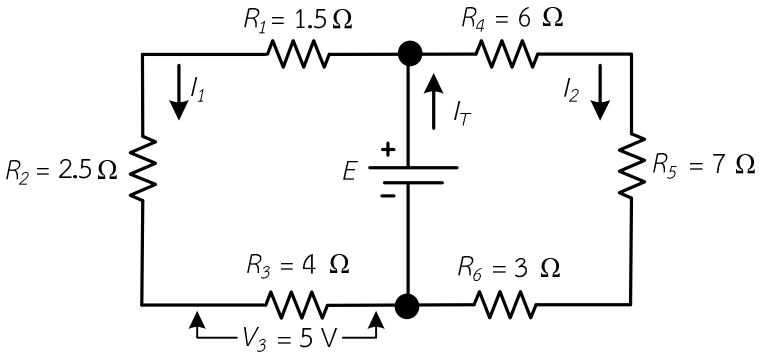
ตัวอย่างที่ 6.4 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.13 จงคำนวณ

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

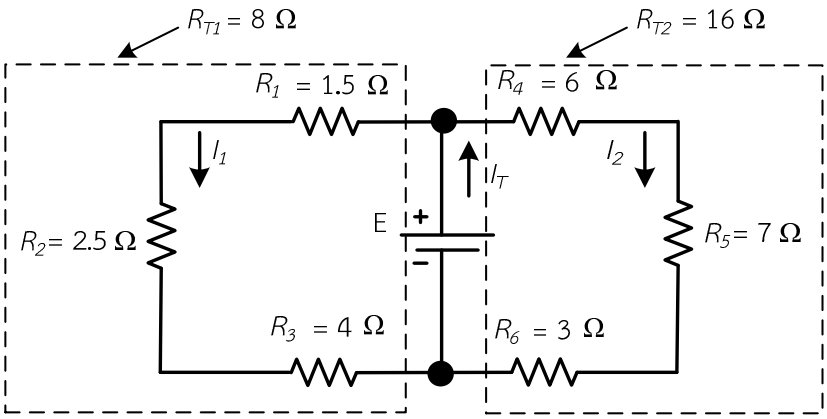
ข. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 ; I_1

ค. แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ; E

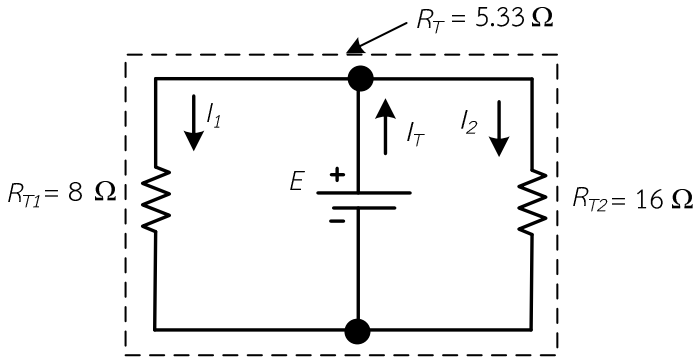
ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_4 , R_5 , R_6 และกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_2 , I_T



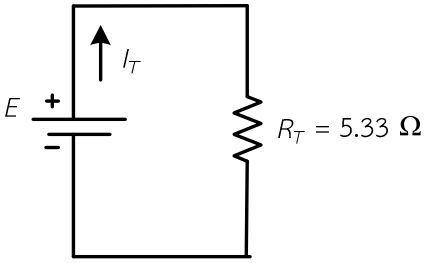
รูปที่ 6.13 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ตามตัวอย่างที่ 6.4



(ก) แสดงการจัดกลุ่ม R_{T1} และ R_{T2}



(ข) แสดงการหาค่า R_{T1} และ R_{T2}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.14 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.4

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = R_1 + R_2 + R_3$$
$$R_{T1} = 1.5\Omega + 2.5\Omega + 4\Omega$$
$$R_{T1} = 8\Omega$$
$$R_{T2} = R_4 + R_5 + R_6$$
$$R_{T2} = 6\Omega + 7\Omega + 3\Omega$$
$$R_{T2} = 16\Omega$$

$$R_T = \frac{R_{T1} \times R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}}$$

$$R_T = \frac{8\ \Omega \times 16\ \Omega}{8\ \Omega + 16\ \Omega}$$

$$R_T = 5.33\ \Omega$$

∴ ความต้านทานรวมของวงจร =5.33 โอห์ม ตอบ

ข. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานกลุ่มที่ 1; I_1

$$I_1 = \frac{V_3}{R_3}$$

$$I_1 = \frac{5\ \text{V}}{4\ \Omega}$$

$$I_1 = 1.25\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1, R_2, R_3 = 1.25 แอมแปร์ ตอบ

ค. แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ; E

$$E = I_1 \times R_{T1}$$

$$E = 1.25\text{A} \times 8\ \Omega$$

$$E = 10\ \text{V}$$

∴ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย = 10 โวลต์ ตอบ

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_4, R_5, R_6 และกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_2 และ I_T

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_T = \frac{10\ \text{V}}{5.33\ \Omega}$$

$$I_T = 1.87\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร= 1.87 แอมแปร์ ตอบ

$$I_2 = I_T - I_1$$

$$I_2 = 1.87\ \text{A} - 1.25\ \text{A}$$

$$I_2 = 0.62\ \text{A}$$

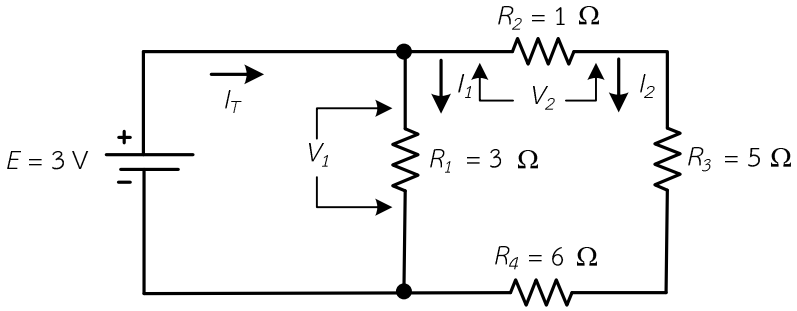
∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_4, R_5, R_6 = 0.62 แอมแปร์ ตอบ

ตัวอย่างที่ 6.5 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.15 จงคำนวณหาค่า

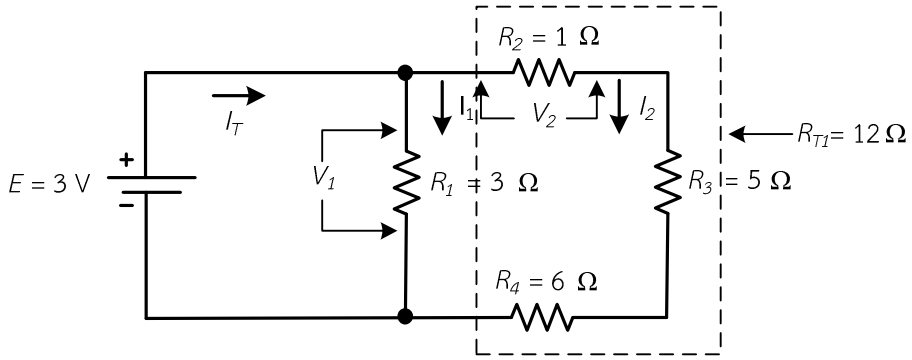
ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

ข. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวและกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_1 , I_2 , I_T

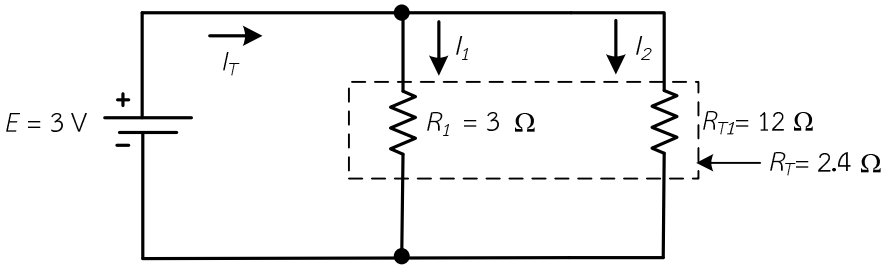
ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 , V_2



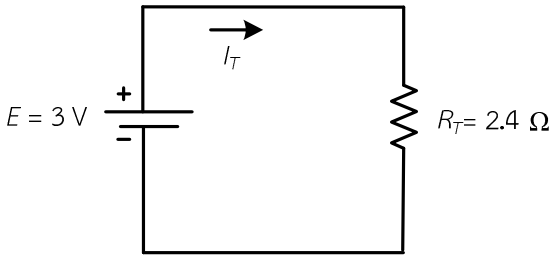
รูปที่ 6.15 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ตามตัวอย่างที่ 6.5



(ก) แสดงการจัดกลุ่มหาค่า R_{T1}



(ข) แสดงการรวมค่า R_1 และ R_{T1}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.16 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.5

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = R_2 + R_3 + R_4$$
$$R_{T1} = 1\,\Omega + 5\,\Omega + 6\,\Omega$$
$$R_{T1} = 12\,\Omega$$
$$R_T = \frac{R_1 \times R_{T1}}{R_1 + R_{T1}}$$
$$R_T = \frac{3\,\Omega \times 12\,\Omega}{3\,\Omega + 12\,\Omega}$$
$$R_T = 2.4\,\Omega$$

$\therefore$ ความต้านทานรวมของวงจร =2.4 โอห์ม <u>ตอบ</u>

ข. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวและกระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_1 , I_2 และ I_T

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$
$$I_T = \frac{3\,\text{V}}{2.4\,\Omega}$$
$$I_T = 1.25\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร= 1.25 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad (V_1 = E = 3\ \text{V})$$
$$I_1 = \frac{3\,\text{V}}{3\,\Omega}$$
$$I_1 = 1\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 = 1 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

$$I_2 = I_T - I_1$$
$$I_2 = 1.25\ \text{A} - 1\ \text{A}$$
$$I_2 = 0.25\ \text{A}$$

$\therefore$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_2 , R_3 , R_4 = 0.25 แอมแปร์ <u>ตอบ</u>

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว;V_1 , V_2

$$V_1 = E = 3\ \text{V}$$

เนื่องจากเป็นวงจรไฟฟ้าแบบขนาน แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ

$\therefore$ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน R_1 = 2 โวลต์ <u>ตอบ</u>

$$V_2 = I_2 \times R_2$$
$$V_2 = 0.25\ \text{A} \times 1\ \Omega$$
$$V_2 = 0.25\text{V}$$

$\therefore$ แรงดันตกคร่อมค่าตัวต้านทาน R_2 = 0.25 โวลต์ ตอบ

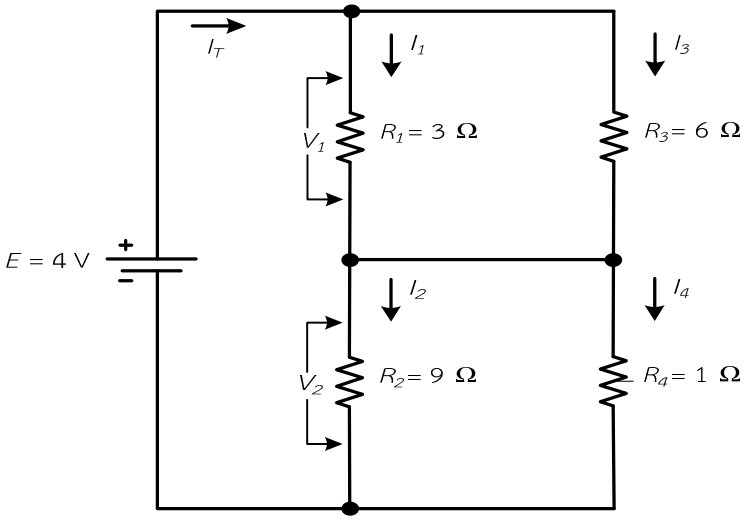
ตัวอย่างที่ 6.6 จากวงจรไฟฟ้า ในรูปที่ 6.17 จงคำนวณหาค่า

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

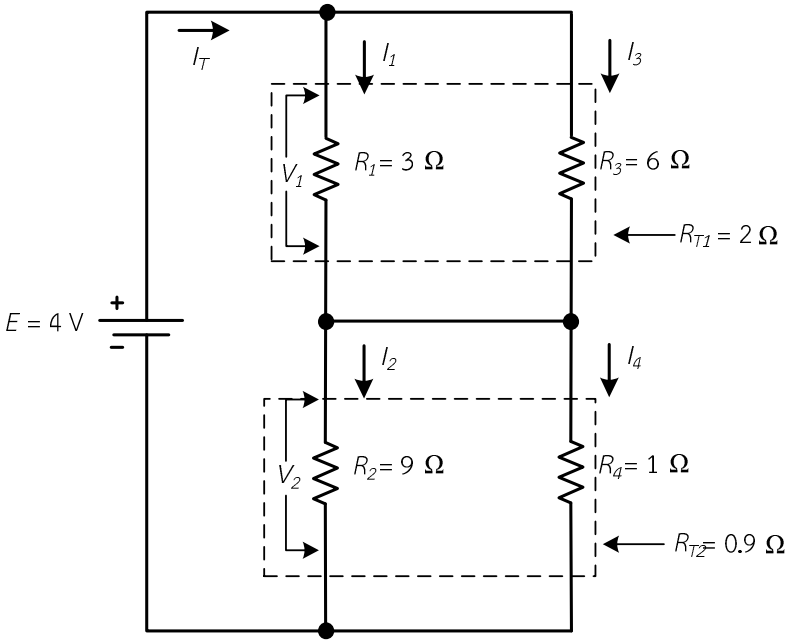
ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร ; I_T

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 , V_2

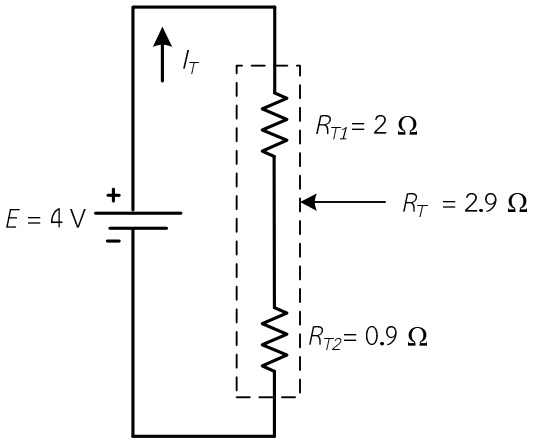
ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1 ,I_2 ,I_3 ,I_4



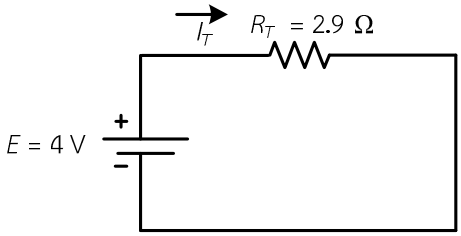
รูปที่ 6.17 วงจรไฟฟ้าแบบผสม ตามตัวอย่างที่ 6.5



(ก) แสดงการจัดกลุ่มหา R_{T1} และ R_{T2}



(ข) แสดงการหาค่า R_{T1} และ R_{T2}



(ค) แสดงการหาค่า R_T

รูปที่ 6.18 แสดงขั้นตอนการหาค่าความต้านทานรวม ตามตัวอย่างที่ 6.6

<u>วิธีทำ</u>

ก. ความต้านทานรวมของวงจร ; R_T

$$R_{T1} = \frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3}$$

$$R_{T1} = \frac{3\,\Omega \times 6\,\Omega}{3\,\Omega + 6\,\Omega}$$

$$R_{T1} = 2\,\Omega$$

$$R_{T2} = \frac{R_2 \times R_4}{R_2 + R_4}$$

$$R_{T2} = \frac{9\,\Omega \times 1\,\Omega}{9\,\Omega + 1\,\Omega}$$

$$R_{T2} = 0.9\,\Omega$$

$$R_T = R_{T1} + R_{T2}$$

$$R_T = 2\,\Omega + 0.9\,\Omega$$

$$R_T = 2.9\,\Omega$$

$\therefore$ ความต้านทานรวมของวงจร = 2.9 โอห์ม <u>ตอบ</u>

ข. กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร; I_T

$$I_T = \frac{E}{R_T}$$

$$I_T = \frac{4\ \mathbf{V}}{2.9\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_T = 1.38\ \text{A}$$

∴กระแสไฟฟ้ารวมของวงจร = 1.38 แอมแปร์ ตอบ

ค. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานแต่ละตัว ; V_1 และ V_2

ในที่นี้เราจะมองค่าความต้านทานเพียง 2 ตัว คือ R_{T1} และ R_{T2} เท่านั้น(ภาพ ข. แสดงการหาค่า R_{T1} และ R_{T2} ในรูปที่ 6.18 แสดงขั้นตอนการรวมความต้านทาน ตามตัวอย่างที่ 6.6)

$$V_1 = I_T \times R_{T1}$$

$$V_1 = 1.38\ \text{A} \times 2\ \mathbf{\Omega}$$

$$V_1 = 2.76\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_1, R_3 = 2.76 โวลต์ ตอบ

$$V_2 = I_T \times R_{T2}$$

$$V_2 \quad 1.38\ \text{A} \times 0.9\ \mathbf{\Omega}$$

$$V_2 = 1.24\ \text{V}$$

∴ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_2, R_4 = 1.24 โวลต์ ตอบ

ง. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ; I_1, I_2, I_3, I_4

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{2.76\ \mathbf{V}}{3\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_1 = 0.92\ \text{A}$$

∴กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 = 0.92 แอมแปร์ ตอบ

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{1.24\ \mathbf{V}}{9\ \mathbf{\Omega}}$$

$$I_2 = 0.14\ \text{A}$$

∴กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_2 = 0.14 แอมแปร์ ตอบ

$$I_3 = \frac{V_1}{R_3}$$

$$I_3 = \frac{2.76\ \mathbf{V}}{6\ \Omega}$$

$$I_3 = 0.46\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน $R_3 = 0.46$ แอมแปร์ ตอบ

$$I_4 = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_4 = \frac{1.24\ \mathbf{V}}{1\ \Omega}$$

$$I_4 = 1.24\ \text{A}$$

∴ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน $R_4 = 1.24$ แอมแปร์ ตอบ

สรุปสาระสำคัญ

ในวงจรไฟฟ้าแบบผสมคือ การนำวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมกับวงจรไฟฟ้าแบบขนานมาต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกันมีการต่อหลายลักษณะไม่มีมาตรฐานตายตัว เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการต่อวงจรตามต้องการ

ในการวิเคราะห์แก้ปัญหาวงจรจะต้องพิจารณาว่ามีตัวต้านทานใดที่ต่อแบบวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรมก็คิดแบบอนุกรม พิจารณาคุณลักษณะ ดังนี้

1. ค่าความต้านทานรวมของวงจรอนุกรม เท่ากับค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัวในวงจรรวมกัน

2. กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานทุกตัวในวงจรเท่ากัน เท่ากับค่ากระแสไฟฟ้ารวมของวงจร

3. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว มีค่าแตกต่างกันไปตามค่าความต้านทานของตัวต้านทานตัวนั้น ความต้านทานน้อยจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมน้อย ความต้านทานมากจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมาก

4. กำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นกับตัวต้านทานแต่ละตัวในวงจร มีค่ามากน้อยแตกต่างกันไปตามค่าความต้านทานของตัวต้านทานตัวนั้น ค่าความต้านทานน้อยจะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อย ค่าความต้านทานมากจะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นมาก

ในการวิเคราะห์แก้ปัญหาวงจรจะต้องพิจารณาว่ามีตัวต้านทานใดที่ต่อแบบวงจรไฟฟ้าแบบขนานก็คิดแบบขนาน พิจารณาคุณลักษณะ ดังนี้

1. ค่าความต้านทานรวมของวงจรขนานจะพบว่าจะมีค่าน้อยกว่าความต้านทานตัวที่มีค่าน้อยที่สุดในวงจร

2. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน (เว้นแต่กรณีที่ตัวต้านทานมีค่าเท่ากัน) ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานน้อย กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันจะมีค่ามากและตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานมาก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันจะมีค่าน้อย กระแสไฟฟ้ารวมของวงจรมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานทุกตัวรวมกัน

3. แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว มีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายที่จ่ายเข้ามา

4. กำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นกับตัวต้านทานแต่ละตัวในวงจร จะมีค่ามากน้อยแตกต่างกันไปตามค่าความต้านทานของตัวต้านทานตัวนั้น ค่าความต้านทานน้อยจะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นมากแต่ค่าความต้านทานมากจะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อย