

หน่วยที่ 2 ไฟฟ้ากระแสตรง

2.1 กระแสไฟฟ้า

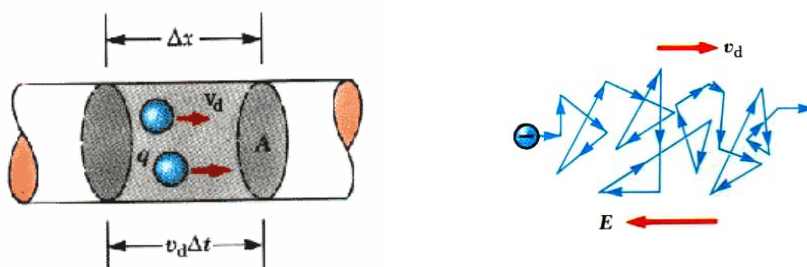
ถ้าประจุมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งหรือเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ กล่าวได้ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณนั้น นิยามกระแสไฟฟ้า (I, Electric Current) คืออัตราการเคลื่อนที่ของประจุผ่านพื้นที่หน้าตัด เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$I = \frac{dq}{dt}$$

หน่วยของกระแสไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อวินาที เรียกหน่วยนี้ว่า แอมแปร์ (A, Ampere) เพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส หน่วยที่เล็กของกระแสไฟฟ้าได้แก่ มิลลิแอมแปร์ และ ไมโครแอมแปร์ โดยที่ $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ และ $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$

เมื่อนำตัวนำวางในสนามไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองของตัวนำ สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงบนอิเล็กตรอนอิสระ ประจุบวกในอะตอมของตัวนำก็ถูกแรงกระทำเช่นเดียวกัน แต่แรงยึดเหนี่ยวภายในนิวเคลียสจะยึดเอาไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ได้ เนื่องจากแรงไฟฟ้าที่กระทำบนอิเล็กตรอนมีทิศตรงข้ามกับทิศของสนาม อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่สวนกับสนาม อิเล็กตรอนจะจัดตัวมันเองในลักษณะที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำมีค่าคงที่ (หรือสนามไฟฟ้าภายในตัวนำมีค่าเป็นศูนย์) เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงเกิดขึ้นเพียงครู่เดียวและจะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในตัวนำอีกต่อไป กระแสนี้เรียกว่ากระแสชั่วขณะ (Transient Current) ถ้าจะให้กระแสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต้องทำให้สนามไฟฟ้าในตัวนำมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา

ปริมาณกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วของประจุและพื้นที่หน้าตัด ให้อิเล็กตรอนในตัวนำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วล่องลอย v_d (drift velocity) ความเร็วของอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะต่างกันเพราะอิเล็กตรอนมีการชนกันเองภายในเนื้อตัวนำทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปด้วย



รูป 2.1 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในตัวนำ และความเร็วล่องลอย



อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวนำซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A ระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้
ในเวลา dt คือ $V_d \Delta t$

ให้ n เป็นจำนวนอิเล็กตรอน/ปริมาตร

ภายในเวลา Δt จำนวนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่

หน้าตัด A จะมีจำนวนเท่ากับ $nAV_d \Delta t$ ขนาดของประจุ

ของอิเล็กตรอนปริมาณดังกล่าวมีค่า $= \Delta q$

$$\Delta q = enAV_d \Delta t$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = enAV_d \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

หลอดทองแดงเส้นหนึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร มีกระแสไฟฟ้าผ่าน 200
แอมแปร์ ความเร็วลอยล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเพียง 0.19 มิลลิเมตร/วินาที (ทองแดง 1 ลูกบาศก์
เมตร มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นจำนวน 8.5×10^{28} ตัว) จะเห็นว่าอิเล็กตรอนซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิด
เกิดกระแสไฟฟ้านั้นเคลื่อนที่ช้ามาก กระแสไฟฟ้าจึงเป็นผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
ซึ่งอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง กระแสไฟฟ้าจึงไม่ใช่ตัว
อิเล็กตรอนแต่อย่างใด

2.2 กฎของโอห์ม

เมื่อนำตัวนำวางไว้ในสนามไฟฟ้า หรือให้ความต่างศักย์เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองของ
ตัวนำ ซึ่งมีความยาว L เมื่อนำความหนาแน่นกระแส (J) และสนามไฟฟ้า (E) มาเทียบอัตราส่วน
กัน จะได้ค่าคงที่ค่าหนึ่งคือ σ เรียกว่าสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำนั้น (Electrical Conductivity) มี
หน่วยเป็น ซีเมนต่อเมตร (siemen /m) เขียนเป็นสมการแสดงเฉพาะขนาดจะได้

$$J = \sigma E$$

$$\text{แทนค่า } J = I/A \text{ และ } E = -dV/dx$$

$$I dx = -\sigma A dV$$

$$I \int_0^L dx = -A \sigma \int_{V_A}^{V_B} dV$$

$$I = \frac{\sigma A}{L} (V_A - V_B) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

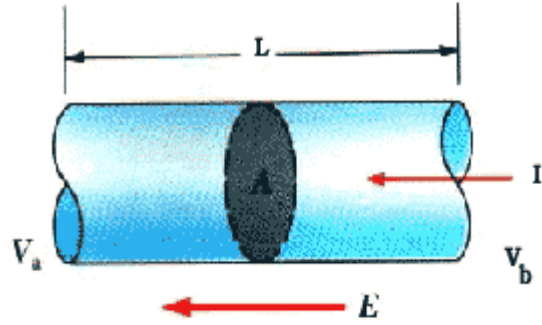
ปริมาณ $\sigma A / L$ เรียกว่า ความนำไฟฟ้าของลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน
ตัวนำมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับว่าโลหะนั้นนำไฟฟ้าได้ดีเพียงใด ถ้าความต่างศักย์ระหว่างจุด 2



จุดมีค่ามาก กระแสจะไหลผ่านตัวนำมากด้วย
ในทางปฏิบัติ เรานิยมใช้ส่วนกลับของความนำ
ไฟฟ้าบอกสมบัติของตัวนำ เรียกว่า ความ
ต้านทาน (Resistance, R)

$$R = \frac{1}{\text{conductance}} = \frac{L}{\sigma A} = \rho \frac{L}{A}$$

.....(2.3)



รูป 2.2 ความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองจะทำให้
เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ

เมื่อ $\rho = 1/\sigma$ เรียกว่าสภาพความต้านทานของตัวนำ (resistivity) มีหน่วยเป็น
โอห์ม-เมตร ค่าจะแปรผันกับอุณหภูมิ โดยทั่วไปโลหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่โลหะ
จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ตาราง 2.1 แสดงสภาพความต้านทานของสารต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส¹

	ρ (โอห์ม . เมตร)	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานแปรตาม อุณหภูมิ (/ องศาเซลเซียส)
อลูมิเนียม	2.6×10^{-8}	0.0039
คอนสแตนแตน(Cu60%,Ni 40%)	49×10^{-8}	0.000002
ทองแดง	1.7×10^{-8}	0.0039
เหล็ก	12×10^{-8}	0.0050
ตะกั่ว	21×10^{-8}	0.0043
ปรอท	98×10^{-8}	0.008
พลาคินัม	11×10^{-8}	0.0036
เงิน	1.6×10^{-8}	0.0038
คาร์บอน	3.5×10^{-5}	-0.0005
เยอรมาเนียม	0.5	-
Copper Oxide	1000	-
แก้ว	$10^{10} - 10^{14}$	-
กำมะถัน	10^{15}	-

¹Beiser, Arthur., **Physics**, (California : Benjamin/Cummings Publishing, 1982) p. 422.



โอห์ม (George Simon Ohm) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ศึกษากระแสไฟฟ้าในตัวนำ สรุปเป็นกฎได้ดังนี้

"ถ้าอุณหภูมิของตัวนำมีค่าคงที่ อัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ของปลายทั้งสองของตัวนำและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำย่อมมีค่าคงที่"

$$\frac{V}{I} = \text{constant} = R \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง I กับ V จะได้เป็นกราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ R กฎของโอห์มสามารถใช้กับตัวนำทั่วไปที่มีความต้านทานไม่ขึ้นกับกระแสและศักย์ไฟฟ้า ตัวนำบางชนิดจะไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง I กับ V แล้วกราฟไม่เป็นเส้นตรง เช่น หลอดสุญญากาศ ทรานซิสเตอร์

2.3 กำลังและพลังงานไฟฟ้า

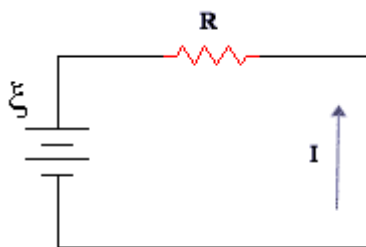
2.3.1 กำลังไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) เกิดจากพลังงานรูปอื่น ๆ เช่นพลังงานเคมี พลังงานกล ฯลฯ เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดที่มันต่ออยู่มีค่าคงที่เสมอ (ในกรณีกระแสตรง) อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้แก่ แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าคืองานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุขนาด 1 หน่วย ผ่านพื้นที่หน้าตัดตัวนำหนึ่ง จากรูป แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด ξ เคลื่อนประจุขนาด dq จากศักย์ไฟฟ้าบวกไปหาศักย์ไฟฟ้าลบเป็น dw ในเวลา dt จะได้

$$\xi = \frac{dW}{dq}$$

$$\text{แต่กำลังไฟฟ้า } P = dw/dt = \xi dq/dt = \xi I$$



รูป 2.7 วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น



ถ้าอุปกรณ์ R มีความต้านทานสอดคล้องกับกฎของโอห์มจะได้

$$P = I^2R$$

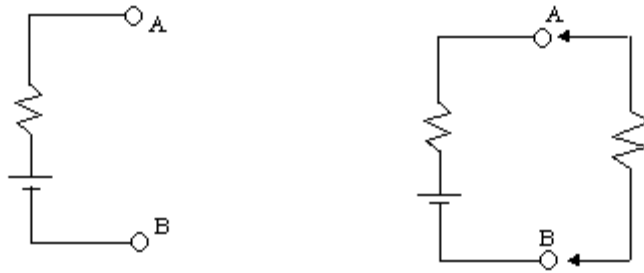
พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกระแส I ในวงจร ให้แหล่งจ่ายไฟมีความต้านทานภายใน r พลังงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะต้องสูญเสียให้แก่ R (ซึ่งอาจสูญเสียไปในรูปของ แสง ความร้อน) และ สูญเสียที่ความต้านทานภายใน r เนื่องจากพลังงานไม่มีการสูญหาย

$$\begin{aligned} \xi I &= I^2R + I^2r \\ I &= \frac{\xi}{(R + r)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการวงจรไฟฟ้า (Circuit Equation)

2.3.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟตรงย่อมมีความต้านทานภายในตัวมันเสมอ พลังงานที่เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่ง จึงต้องสูญเสียไปเพราะความต้านทานภายในของอุปกรณ์เหล่านี้ ให้ ξ เป็นพลังงานเคมีที่เปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าของแบตเตอรี่ A และ B เป็นขั้วของแบตเตอรี่ เมื่อไม่มีการต่อวงจรภายนอก ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม AB ของแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับ ξ เรียกว่า ความต่างศักย์เมื่อไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (no-load voltage)



ก. เมื่อไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ข. เมื่อต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

รูป 2.8 ความต่างศักย์ที่ขั้วของแหล่งจ่ายไฟตรง



ตัวอย่าง 2.2 ถ้าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เท่ากับ 1,000 โอห์ม แรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะที่ยังไม่ต่อกับวงจรภายนอกมีค่า 100 โวลต์ จงหากำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานเมื่อ มีค่าต่าง ๆ กัน

- ก. 500 โอห์ม
ข. 1000 โอห์ม
ค. 1500 โอห์ม

วิธีทำ ก. เมื่อ $R = 100$ โอห์ม

$$I = \frac{\xi}{(R + r)} = \frac{100}{1000 + 500} = 0.0667 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$\text{ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน} = V = IR = 33.4 \text{ โวลต์}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน} = P = VI = 0.0667 \times 33.4 = 2.22 \text{ วัตต์}$$

ข. เมื่อ $R = 1000$ โอห์ม

$$I = \frac{\xi}{(R + r)} = \frac{100}{1000 + 1000} = 0.05 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$\text{ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน} = V = IR = 50 \text{ โวลต์}$$

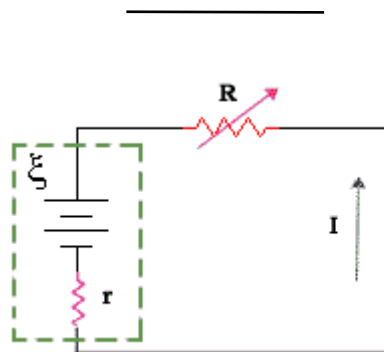
$$\text{กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน} = P = VI = 2.5 \text{ วัตต์}$$

ค. เมื่อ $R = 1500$ โอห์ม

$$I = \frac{\xi}{(R + r)} = \frac{100}{1000 + 1500} = 0.04 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$\text{ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน} = V = IR = 60 \text{ โวลต์}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน} = P = VI = 2.4 \text{ วัตต์}$$



รูป 2.9 วงจรไฟฟ้าที่ R เปลี่ยนค่าได้ แหล่งจ่ายไฟมีความต้านทานภายใน

จากรูป 2.9 ความต้านทาน R ต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า $= \xi$ มีความต้านทานภายใน $= r$

$$\text{กระแสไฟฟ้าในวงจร (I)} = \frac{\xi}{R_L + r}$$



$$\text{แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม } R_L (V_L) = IR_L = \left(\frac{\xi}{R_L + r} \right) R$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าบนตัวต้านทาน } R_L = V_L I = \frac{\xi^2}{(R_L + r)^2}$$

ถ้าต้องการให้เกิดกำลังไฟฟ้ามากที่สุดบนตัวต้านทาน R_L ควรใช้ค่า R_L เท่ากับเท่าใด
ที่ค่า R_L ที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะได้

$$\frac{dP}{dR_L} = 0$$

$$\left[\frac{1}{(R_L + r)^2} - \frac{2R}{(R + r)^3} \right] = 0$$

$$R_L = r$$

จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบน R_L เมื่อ R_L มีค่าเท่ากับความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า (Efficiency) คือ อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เกิดบนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรานำไปใช้งาน (P_L) กับกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟจ่ายให้จริง ๆ (P_S)

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า } (\eta) = \frac{P_L}{P_S} \times 100\%$$

วงจรในรูป 2.9 ถ้ากำหนดให้ $\xi = 20$ โวลต์ $r = 10$ โอห์ม เปลี่ยนค่า R_L ให้มีค่าต่าง ๆ กัน คำนวณหา กำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบน R_L และประสิทธิภาพของวงจรจะเป็นดังนี้

R_L	$R_L + r$	I (A)	$V_L = IR_L$	$P_L = I^2 R_L$	$y = \frac{I^2 R_L}{\xi I} \times 100$
0	10	2	0	0	0
2	12	1.67	3.33	5.55	16.7
4	14	1.43	5.72	8.17	40.9
6	16	1.25	7.50	9.36	46.8
8	18	1.11	8.88	9.84	49.2
10	20	1	10	10	50
12	22	0.908	10.91	9.94	54.6
14	24	0.833	11.69	9.74	58.5
16	26	0.769	12.28	9.34	61.4
18	28	0.719	12.86	9.19	64.3
20	30	0.667	13.33	8.89	66.7
30	40	0.5	15	7.50	75
40	50	0.4	16	6.40	80

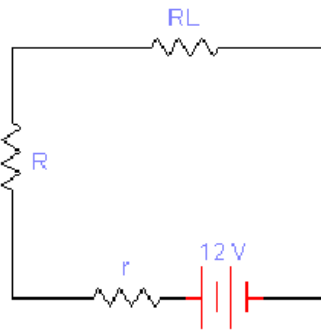


จะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อ $R_L = r$ ที่จุดนี้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบน R_L มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ (ตอนที่ยังไม่ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า) ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าเพียง 50% เมื่อ R_L เพิ่มค่าพ้นจากจุดนี้ ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น และจะเกือบ 100% เมื่อ R มีค่ามาก ๆ

เรื่องนี้มีความสำคัญมากในเรื่องการสื่อสารสัญญาณ เช่น ในสายอากาศ กำลังของสัญญาณจะถูกส่งผ่านได้มากที่สุด เมื่อตัวต้านทานที่เป็น load resistor มีความต้านทานเท่ากับ ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายสัญญาณ ซึ่งเรียกว่าแมตช์ (match) กัน

ตัวอย่าง 2.3 ไฟฟ้าในระบบรถยนต์มีแรงเคลื่อน 12 โวลต์ วิทยุติดในรถยนต์ใช้ไฟ 6 โวลต์ กินกระแส 6 แอมแปร์ ต้องใช้ R ขนาดเท่าใดต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้าในรถยนต์เพื่อใช้กับวิทยุได้ จงหาประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า

รูป 2.10



วิธีทำ สมมติว่าแหล่งจ่ายไฟไม่มีความต้านทานภายใน ($r = 0$)

$$\begin{aligned} \text{แรงดันตกคร่อม } R &= V_R = \xi - V_L \\ &= 12 - 6 = 6 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

$$\text{ต้องการตัวต้านทาน } R = \frac{V_R}{I} = \frac{6}{6} = 1 \text{ โอห์ม}$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบไฟฟ้ารถยนต์

$$\begin{aligned} &= \xi I = 12 \times 6 \text{ วัตต์} \\ &= 72 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายที่วิทยุ} &= V_L I = 6 \times 6 \text{ วัตต์} \\ &= 36 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ ประสิทธิภาพ} &= \frac{P_L}{P_S} \times 100 = \frac{36}{72} \times 100 \\ &= 50 \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้าจะหายไปครึ่งหนึ่งกลายเป็นความร้อนที่ R และ R ที่ใช้จะต้องมีขนาด 36 วัตต์



2.3.3 วงจรไฟฟ้าและการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟตรงในวงจรไฟฟ้า แบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

1. แหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (voltage source) ในทางอุดมคติจะถือว่าแหล่งจ่ายไฟชนิดนี้จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่เสมอ ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้า (load) ที่นำมาต่อ ไม่ว่าจะอุปกรณ์
2. นั้นจะมีความต้านทานเป็นศูนย์ (short circuit) หรือมีความต้านทานอนันต์ (open circuit) ซึ่งจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อความต้านทานภายในแหล่งจ่ายไฟตรงมีค่าเป็นศูนย์ โดยปกติแล้วแหล่งจ่ายไฟจะมีค่าความต้านทานภายในค่าหนึ่งเสมอ



แหล่งจ่ายไฟแรงดันคงที่ในอุดมคติ

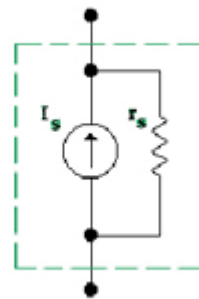


แหล่งจ่ายไฟคงที่ในสภาพที่เป็นจริง

รูป 2.11 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายไฟตรงแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่

2. แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Current Source)

ในทางอุดมคติถือว่าแหล่งจ่ายไฟจะจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่เสมอไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ที่นำมาต่อ ความต้านทานของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเป็นอนันต์ ในทางปฏิบัติแหล่งจ่ายไฟชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานภายในเสมอ ลูกศรให้สัญลักษณ์แหล่งจ่ายไฟจะแสดงทิศของกระแสสมมติ (conventional current) หนังสือบางเล่มอาจใช้เป็นกระแสอิเล็กทรอนิกส์



รูป 2.12 ก. แหล่งจ่ายไฟตรงกระแสคงที่ในอุดมคติ และ ข. แหล่งจ่ายไฟตามสภาพที่แท้จริง



ในวงจรที่มีแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ สามารถเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ของแหล่งจ่ายไฟให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยที่ยังมีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมือนเดิมทุกประการ หรือเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้เป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ได้เช่นกัน

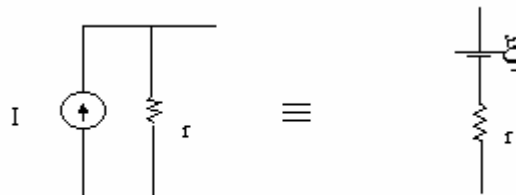
วิธีเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ทำได้ดังนี้



รูป 2.13

1. ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟทั้งสองมีค่าเท่ากัน คือ r
2. หาค่ากระแสไฟฟ้าเทียบเท่า โดยใช้กฎของโอห์ม คือ $I = \mathcal{E}/r$

วิธีเปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ให้เป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ มีดังนี้

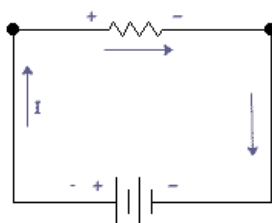


รูป 2.14

1. ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟทั้งสองมีค่าเท่ากัน คือ r
2. หาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเทียบเท่า โดยใช้กฎของโอห์ม คือ $\mathcal{E} = Ir$

2.4 กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's law)

กุสตาฟ โรเบิร์ต เคิร์ชฮอฟฟ์ (Gustav Robert Kirchhoff) เป็นนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน มีชีวิตอยู่ในช่วง ค.ศ. 1824-1887 เคิร์ชฮอฟฟ์และคณะของเขาได้คิดค้นวิธีวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเครือข่าย (networks) ประกอบด้วยตัวต้านทานต่อกันอย่างซับซ้อน มีแหล่งจ่ายไฟหลายชุด



รูป 2.15



พิจารณาวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นดังรูป ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทาน R ด้านใดจะเป็นบวกหรือลบดูจากทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจาก ศักย์ไฟฟ้าบวกไปสู่ศักย์ไฟฟ้าลบเสมอ

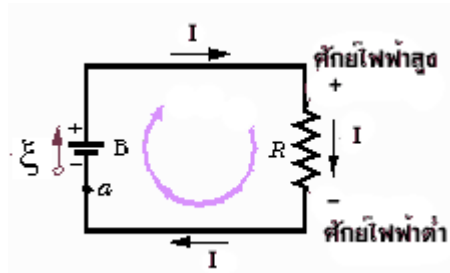
กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์แบ่งออกเป็น 2 ข้อใหญ่ ๆ ดังนี้

1. กฎเกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้า (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) มีใจความดังนี้

“ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มค่าหรือลดค่ารอบวงจรปิด มีค่าเป็นศูนย์”

(The algebraic sum of the potential rises and drops around any closed loop is zero)

วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยตัวต้านทานดังรูป



รูป 2.16 วงจรที่มีวงปิดเพียง 1 วง

จากรูป 2.16 จะเริ่มต้นวนวงปิดที่จุด a ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น V_a ไปในทิศตามเข็มนาฬิกา จะวนไปรอบวงปิดจนกระทั่งมาถึงที่จุด a อีกครั้ง ในระหว่างที่วนนั้นจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วย ที่จุด a เป็นขั้วลบของแบตเตอรี่ วนไปหาขั้วบวกซึ่งถือว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่หรือที่เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า คือ ξ เมื่อวนผ่านแบตเตอรี่ความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น (rise in potential) เป็น $+\xi$ (เพิ่มจากค่าลบเป็นค่าบวก)

เมื่อวนผ่านลวดตัวนำต้านบน ลวดตัวนำมีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ลวดตัวนำ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลวดตัวนำจึงมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ วนเรื่อยมาจนถึงตัวต้านทาน R ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าลดลง (Drop in potential, เปลี่ยนจากค่าบวกเป็นลบ) เท่ากับ $-IR$

เมื่อวนออกจากตัวต้านทาน มาบรรจบที่จุด a อีกครั้ง ศักย์ไฟฟ้าที่จุด a ก็คือ V_a นั่นเอง ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_a + \xi - IR &= V_a \\ \xi - IR &= 0 \end{aligned}$$

เมื่อวนทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise) จะได้ผลลัพธ์ เช่นเดียวกัน



$$- \xi + IR = 0$$

การวนรอบวงปิดจะวนทวนเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ สำคัญตรงที่ต้องใส่เครื่องหมายหน้า ξ หรือ IR ให้ถูกต้อง

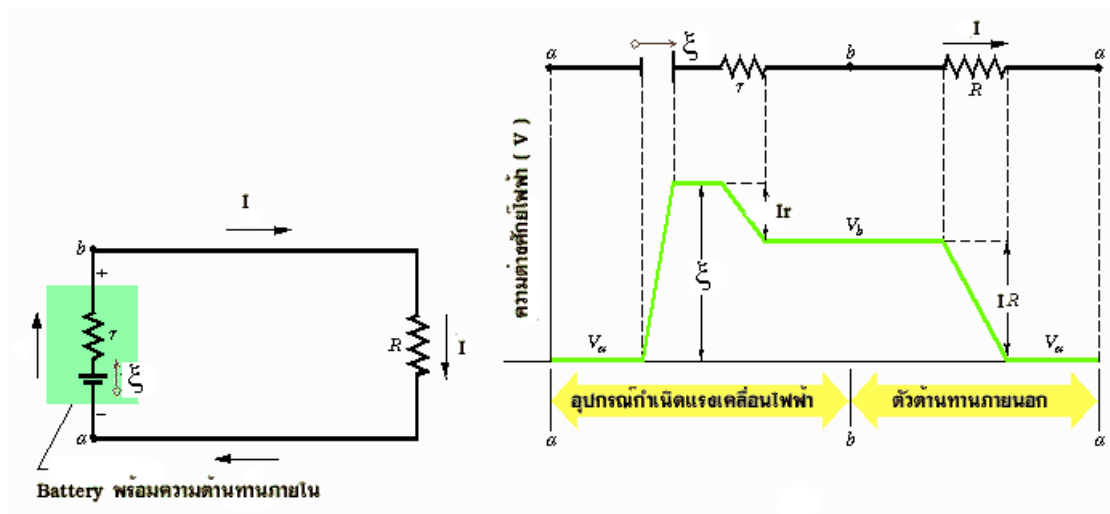
ก่อนที่จะไปพบวงจรที่ซับซ้อน สามารถสรุปการวนรอบวงปิดเป็นกฎ 2 ข้อ ดังนี้

1. กฎของตัวต้านทาน เมื่อวนผ่านตัวต้านทานในทิศเดียวกับทิศกระแสไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ $-IR$ ถ้าววนในทิศสวนกับกระแสไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยค่า $+IR$

เพื่อให้จำได้ง่าย ให้นักศึกษานึกถึงการเดินลุยลำธารบนภูเขา ถ้าเราเดินตามลำน้ำ ความชันของภูเขาจะมีค่าลดลง ถ้าเดินสวนกับกระแสน้ำในลำธาร ความชันของภูเขาจะมีค่าเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นบวก)

2. กฎของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถ้าววนผ่านแหล่งจ่ายไฟในทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (จากขั้วลบไปยังขั้วบวก) ความต่างศักย์ที่ขั้วแหล่งจ่ายไฟจะเป็น $+\xi$ ถ้าการวนจากแหล่งจ่ายไฟมาจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ความต่างศักย์ที่ขั้วแหล่งจ่ายไฟจะเป็น $-\xi$

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟย่อมมีความต้านทานภายใน (Internal resistance, r) เสมอ เว้นเสียแต่จะคิดว่าแหล่งจ่ายไฟนั้นเป็นแบบอุดมคติ คือความต้านทานภายในเป็นศูนย์ วงจรที่เป็นวงปิดเพียงวงเดียวแต่คิดความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟด้วย จะเป็นดังรูปที่ 2.17

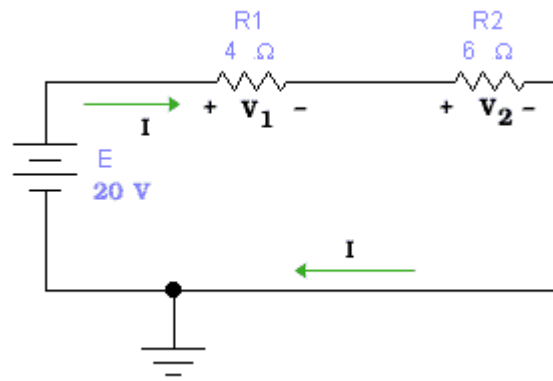


รูป 2.17 วงจรไฟฟ้าที่คิดความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟตรง

รูป 2.17 ด้านขวามือ แสดงให้เห็นว่ากฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ข้อนี้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน ขณะที่ประจุไฟฟ้าเดินทางผ่านวงจรมาบรรจบที่จุดเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง ผลรวมของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแต่ละจุดจะเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หายไป



ตัวอย่าง 2.4 จากรูป 2.18 จงคำนวณหา กระแสที่ไหลในวงจร โดยใช้กฎเคิร์ชฮอฟฟ์



รูป 2.18 วงจรปิดวงเดียวที่มีตัวต้านทาน 2 ตัว

วิธีทำ ตัวอย่างนี้สามารถใช้กฎของโอห์มคำนวณได้โดยง่าย และมีสัญลักษณ์กราวด์เพิ่มขึ้นในวงจร ซึ่งหมายถึงเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่งอ้างอิงนี้ถือว่ามีค่าเป็นศูนย์

ในที่นี้จะใช้กฎ KVL คำนวณโดยเริ่มวนวงปิดที่ขั้วลบแบตเตอรี่วนไปในทิศตามเข็มนาฬิกา จะได้

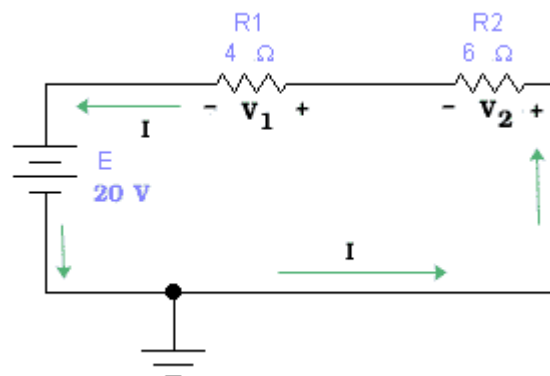
$$E - IR_1 - IR_2 = 0$$

แทนค่า E, R_1 และ R_2

$$20 - 4I - 6I = 0$$

$$I = 20 / 10 = 2 \text{ A}$$

ถ้าเปลี่ยนทิศของกระแสไฟฟ้าในวงจรให้ไหลในทิศตรงข้ามดังรูปที่ 2.19 การวนวงปิดยังคงตามเข็มนาฬิกาเช่นเดิมเครื่องหมายแสดงค่าความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานแต่ละตัวจะเปลี่ยนไป เช่นกัน ดังรูป 2.19



รูป 2.19 เมื่อกลับทิศกระแสไปในทิศตรงกันข้าม

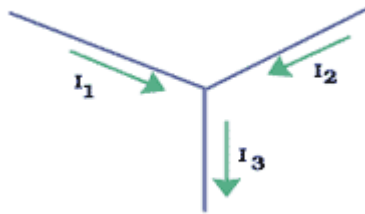


$$\begin{aligned}
 \text{จะได้} \quad & +E + IR_1 + IR_2 = 0 \\
 & +20 + 4I + 6I = 0 \\
 & I = -20 / 10 = -2 \text{ A}
 \end{aligned}$$

เครื่องหมายลบแสดงว่าทิศทางของ I ที่กำหนดในกรณีนี้ไม่ถูกต้อง ต้องกลับทิศของกระแสไปอีกทางหนึ่ง

2. กฎเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า (Kirchhoff's Current Law, KCL)

มีใจความว่า “ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าผ่านจุดแยก หรือชุมทางใด ๆ มีค่าเป็นศูนย์” (The algebraic sum of the currents at a node is zero)



การรวมทางพีชคณิตนั้นกำหนดให้กระแสไหลเข้าเป็นบวก กระแสจากรูป 2.20 จะได้

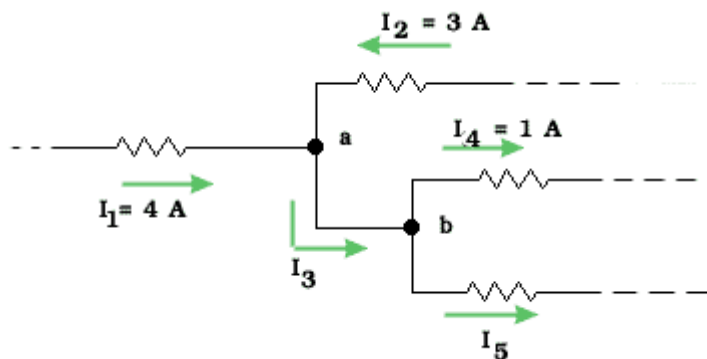
รูป 2.20 แสดงกระแสตรงทางแยก

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 + I_2 = I_3$$

หรือ ผลรวมของกระแสไหลเข้าที่จุดแยกเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากจุดแยก กฎข้อนี้เป็นผลมาจากกฎการอนุรักษ์ของประจุไฟฟ้า เนื่องจากในวงจรไม่มีการสะสมประจุไว้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าที่จุดใด ๆ จึงต้องเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออก

ตัวอย่าง 2.5 จงหากระแสไฟฟ้า I_3 และ I_5 ดังรูป 2.21





รูป 2.21 ภาพตัดตอนการไหลของกระแสไฟฟ้าในจุดต่อของวงจรหนึ่ง

วิธีทำ เพราะว่าจุดเชื่อมต่อ a มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียว เราจึงเริ่มคำนวณตรงจุดเชื่อมต่อ a ก่อน

ที่จุด a จะได้	$I_1 + I_2$	=	I_3
	$4 A + 3 A$	=	I_3
	I_3	=	$7 A$
ที่จุดต่อ b จะได้	$I_3 - I_4 - I_5$	=	0
	$7 A - 1 A - I_5$	=	0
	I_5	=	$6 A$

ขั้นตอนการนำกฎเคอร์ชอฟไปใช้แก้ปัญหา

1. กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละวงจรปิด
2. กำหนดเครื่องหมายของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตัวต้านทานแต่ละตัว โดยใช้ทิศของกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก
3. หาผลรวมของความต่างศักย์รอบวงจรปิด จะวนทวนหรือตามเข็มนาฬิกาก็ได้
4. หาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้น อาจใช้กฎ KCL ช่วยลดจำนวนตัวแปรให้เหลือน้อยลง

ข้อที่ควรระวังคือ แหล่งจ่ายไฟในวงจรจะต้องเป็นแหล่งจ่ายไฟประเภทแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่เท่านั้น (Voltage source) ถ้ามีแหล่งจ่ายไฟประเภทกระแสคงที่ จะต้องเปลี่ยนให้เทียบเท่ากับ แหล่งจ่ายไฟประเภทแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่เสียก่อน

ในวงจรที่ซับซ้อน การคาดคะเนว่าต้องใช้วงจรปิดกี่วงจึงจะคำนวณกระแสไฟฟ้าได้ครบ อาจทำได้ลำบาก จำนวนสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

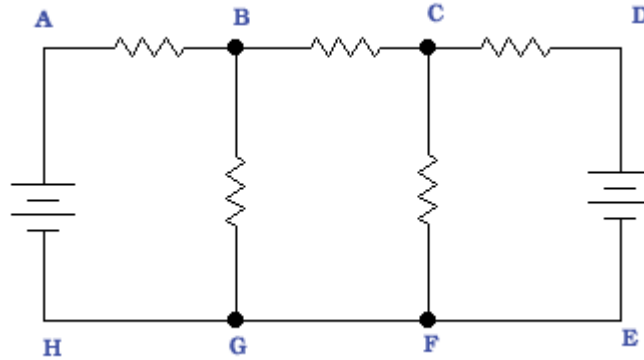
$$\text{จำนวนสมการที่ต้องการ} = \text{จำนวนสาขา} - (\text{จำนวนจุดแยกสำคัญ} - 1)$$

จุดแยกสำคัญ (principle node) หมายถึงจุดแยกซึ่งเป็นที่รวมของสาขา (branch) ตั้งแต่ 3 สาขาขึ้นไป

สาขา (branch) คือ เส้นทางของวงจรไฟฟ้า ต้องประกอบด้วยตัวต้านทาน หรือแหล่งจ่ายไฟอย่างน้อย 1 ตัวหรือมากกว่า เส้นทางเหล่านี้เชื่อมต่อระหว่างจุดแยกสำคัญกับจุดแยกสำคัญด้วยกัน



ตัวอย่าง 2.6 จากรูป 2.22 ถ้าต้องการหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานทุกตัว ต้องกำหนดกระแสอย่างน้อยกี่วงจึงจะคำนวณหาค่าได้



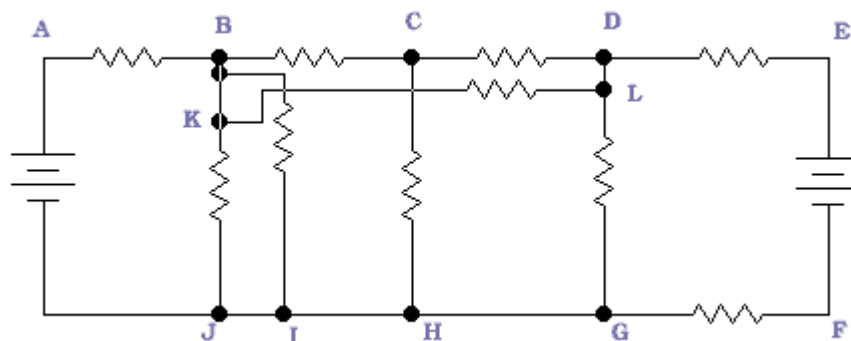
รูป 2.22

วิธีทำ นับจำนวนสาขาจะได้ = 5 สาขา (คือ BAHG, BG, BC, CF, CDEF)
 นับจำนวนจุดแยกสำคัญ = 3 จุด (คือ จุด B, C และ F)
 จุด H, G, F, E ถือว่าเป็นจุดร่วมกัน
 จำนวนสมการที่ต้องการใช้ในการคำนวณ

$$= 5 - (3 - 1) = 3$$

 นั่นคือ ต้องกำหนดกระแสจำนวน 3 วง

ตัวอย่าง 2.7 จงหาจำนวนสมการที่ใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป 2.23

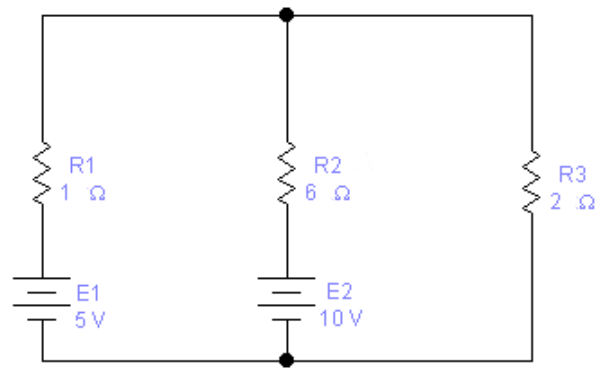
วิธีทำ จำนวนสาขา = 9 สาขา (คือ ABJ, BKJ, BI, BC, KL, DLG, CD, CH, DEFG)



จำนวนจุดแยกสำคัญ = 4 จุด (จุด B, จุด C, จุด D และจุด H)
 (จุด B และ K เป็นจุดเดียวกัน)
 (จุด D และ L เป็นจุดเดียวกัน)
 (จุด J, I, H, G เป็นจุดเดียวกัน)

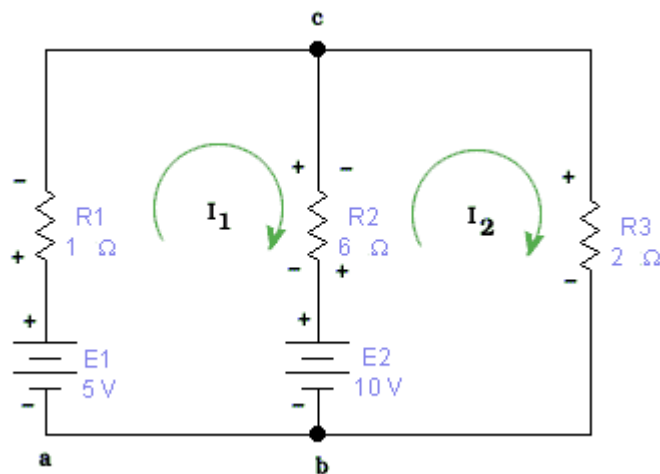
จำนวนสมการ = $9 - (4 - 1) = 6$ สมการ

ตัวอย่าง 2.8 จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป 2.24

กำหนดกระแสในวงปิดแต่ละวง กำหนดเครื่องหมายศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว ใช้กฎ KVL หาสมการความต่างศักย์ไฟฟ้าของแต่ละวง



รูป 2.25



วงปิดที่ 1 (ด้านซ้ายมือ) วนตามเข็มนาฬิกา เริ่มจากจุด a

$$\begin{aligned} E_1 - I_1 R_1 - I_1 R_2 + I_2 R_2 - E_2 &= 0 \\ 5 - 1I_1 - 6I_2 + 6I_2 - 10 &= 0 \\ -7I_1 + 6I_2 &= 5 \quad \dots(1) \end{aligned}$$

วงปิดที่ 2 (ด้านขวามือ) วนตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน เริ่มจากจุด b

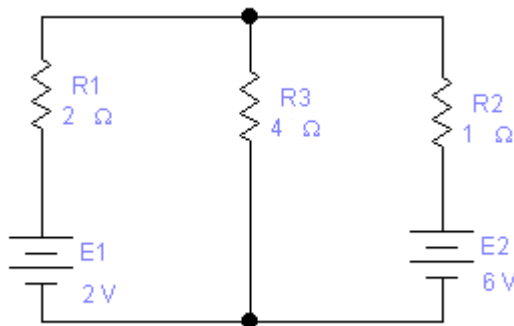
$$\begin{aligned} E_2 - I_2 R_2 + I_1 R_2 - I_2 R_3 &= 0 \\ 10 - 6I_2 + 6I_1 - 2I_2 &= 0 \\ 6I_1 + 8I_2 &= -10 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

แก้สมการ (1) และ (2) หาค่า I_1 I_2

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} +5 & -6 \\ -10 & -8 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -7 & +6 \\ +6 & -8 \end{vmatrix}} = 1 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} -7 & +5 \\ +6 & -10 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -7 & +6 \\ +6 & -8 \end{vmatrix}} = 2 \text{ A}$$

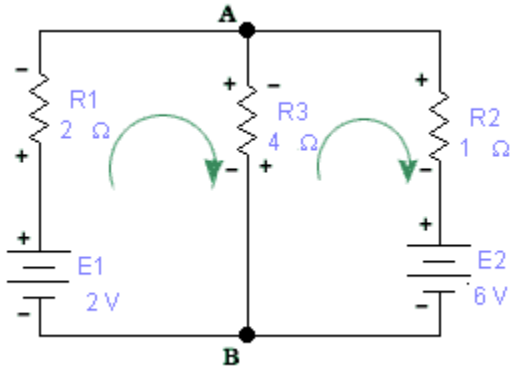
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_2 คือ $I_2 - I_1 = 1 \text{ A}$ ทิศการไหลมีทิศเดียวกับทิศของ I_2
ตัวอย่าง 2.9 จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป 2.26



วิธีทำ กำหนดกระแสในวงจรปิดแต่ละวง กำหนดเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน จะมีกระแสไฟฟ้า I_1, I_2 ซึ่งเป็นตัวไม่ทราบค่า มีวงจรปิดอยู่ 2 วง



รูป 2.27

พิจารณาวงจรปิดวงที่ 1 (ด้านซ้ายมือ)

เริ่มต้นวนจากจุด B วนตามเข็มนาฬิกา

$$+2 - I_1 R_1 - I_1 R_3 + I_2 R_3 = 0$$

$$+2 - 2I_1 - 4I_1 + 4I_2 = 0$$

$$-6I_1 + 4I_2 = -2$$

$$3I_1 - 2I_2 = +1 \dots\dots\dots (1)$$

วงจรถัดที่ 2 (ด้านขวามือ) วนตามเข็มนาฬิกา เริ่มต้นจากจุด A

$$-I_2 R_2 - 6 - I_2 R_3 + I_1 R_3 = 0$$

$$-1I_2 - 6 - 4I_2 + 4I_1 = 0$$

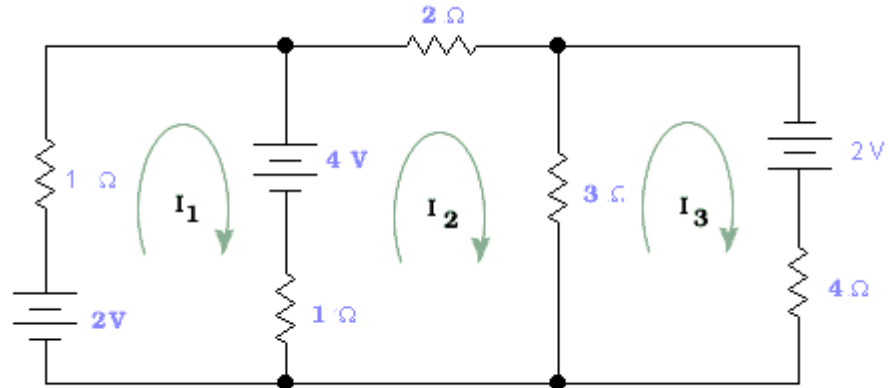
$$4I_1 - 5I_2 = 6 \dots\dots\dots (2)$$

จากสมการ (1) และ (2) หาค่า I_1 และ I_2 จะได้

$$I_1 = -1 \text{ A}$$

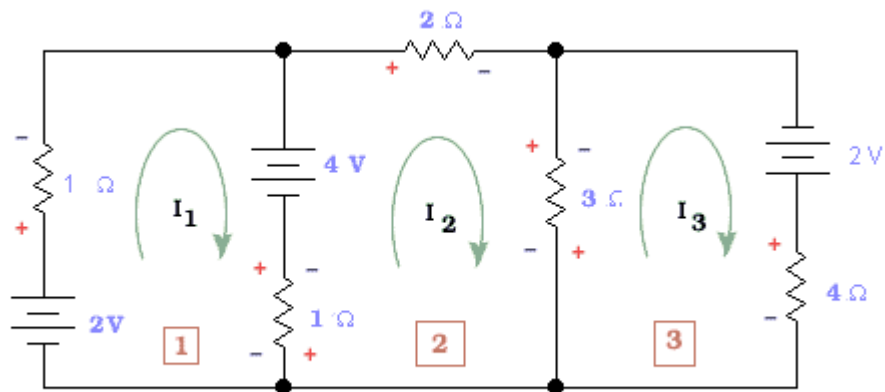
$$I_2 = -2 \text{ A}$$

I_1, I_2 มีค่าเป็นลบ แสดงว่ากำหนดทิศของกระแสไม่ถูกต้อง กระแสไฟฟ้าจะไหลในทิศตรงกันข้ามกับที่กำหนดไว้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_1 คือ 1 A กระแสที่ไหลผ่าน R_3 คือ $I_1 - I_2 = -1 - (-2) = +1 \text{ A}$ มีทิศเดียวกับ I_1 . กระแสที่ไหลผ่าน R_2 คือ 2 A (มีทิศสวนกับทิศที่กำหนดไว้)

ตัวอย่าง 2.10 จงหากระแส I_1 , I_2 และ I_3 

รูป 2.28

วิธีทำ ใส่เครื่องหมายบวกลบที่ตัวต้านทานในแต่ละวงปิดดัง รูปที่ 2.29



รูป 2.29

วงปิดที่ 1 วนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} 2 - I_1 - 4 - I_1 + I_2 &= 0 \\ -2I_1 + I_2 &= 2 \quad \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

วงปิดที่ 2 วนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} -I_2 + I_1 + 4 - 2I_2 - 3I_2 + 3I_3 &= 0 \\ I_1 - 6I_2 + 3I_3 &= -4 \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

วงปิดที่ 3 วนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} -3I_3 + 3I_2 + 2 - 4I_3 &= 0 \\ 3I_2 - 7I_3 &= -2 \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$



จากสมการ (1) (2) และ (3) จัดลำดับตัวแปร I_1 , I_2 และ I_3 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรมีลักษณะสมมาตรตามแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นหลักไว้ใช้ตรวจสอบความถูกต้องในการหาสมการความต่างศักย์รบบวงปิด

$$\begin{aligned} -2I_1 + I_2 &= 2 \\ I_1 - 6I_2 + 3I_3 &= -4 \\ 3I_2 - 7I_3 &= -2 \end{aligned}$$

แก้สมการหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} +2 & +1 & 0 \\ -4 & -6 & +3 \\ -2 & +3 & -7 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -2 & +1 & 0 \\ +1 & -6 & +3 \\ 0 & +3 & -7 \end{vmatrix}} = \frac{-32}{59} = -0.5424 \quad \text{A}$$

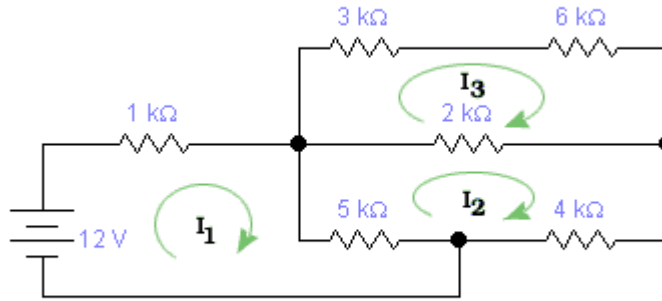
$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} -2 & +2 & 0 \\ +1 & -4 & +3 \\ 0 & -2 & -7 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -2 & +1 & 0 \\ +1 & -6 & +3 \\ 0 & +3 & -7 \end{vmatrix}} = \frac{54}{59} = 0.9153 \quad \text{A}$$

$$I_3 = \frac{\begin{vmatrix} -2 & +1 & +2 \\ +1 & -6 & -4 \\ 0 & -3 & -2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -2 & +1 & 0 \\ +1 & -6 & +3 \\ 0 & +3 & -7 \end{vmatrix}} = \frac{40}{59} = 0.6780 \quad \text{A}$$

จะเห็นว่า มีกระแส I_1 เพียงค่าเดียวที่มีทิศสวนกับทิศของกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้



ตัวอย่าง 2.11 จงหากระแส I_1 , I_2 และ I_3 ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นกิโลโอห์ม



รูป 2.30

วิธีทำ ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นกิโลโอห์ม กระแสที่ได้จะมีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ อันที่จริงตัวอย่างนี้สามารถทำได้โดยวิธีรวมความต้านทานแล้วใช้กฎของโอห์มคำนวณหากระแสไฟฟ้า ในที่นี่จะใช้กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์

วงที่ 1 จะได้อนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} +12 - (1k)I_1 - (5k)I_1 + (5k)I_2 &= 0 \\ 6I_1 - 5I_2 &= 12 \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

วงที่ 2 (วงที่มีกระแส I_2) วนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} -(2k)I_2 + (2k)I_3 - (5k)I_2 + (5k)I_1 - (4k)I_2 &= 0 \\ 5I_1 - 11I_2 + 2I_3 &= 0 \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

วงที่ 3 วนตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned} -(3k)I_3 - (6k)I_3 - (2k)I_3 + (2k)I_2 &= 0 \\ 2I_2 - 11I_3 &= 0 \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

แก้สมการ (1), (2) และ (3) จะได้

$$\begin{aligned} I_1 &= 3.29 \text{ mA} \\ I_2 &= 1.55 \text{ mA} \\ I_3 &= 0.28 \text{ mA} \end{aligned}$$

ทิศของกระแสที่กำหนดไว้ถูกต้องแล้ว



233 การใช้วิธีวิเคราะห์จุดแยกวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า (Nodal Analysis)

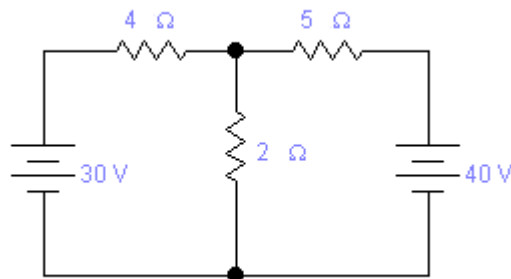
เราใช้กฎเคอร์ชอฟ เขียนสมการความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อหากระแสไฟฟ้า การวิเคราะห์จุดแยกนี้จะใช้กฎ KCL เขียนสมการกระแสเพื่อหาความต่างศักย์ไฟฟ้า ในวงจรที่ประกอบด้วยสาขา (branch) หลาย ๆ สาขาต่อขนานกัน จำนวนวงจรปิดจะมีมากกว่าจำนวนจุดแยก (node) เมื่อใช้จุดแยกมาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าจะได้จำนวนสมการที่น้อยกว่า

ความต่างศักย์ที่จุดแยก (node voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างจุดแยก 2 จุด อาจจะเป็นจุดแยกที่จุดใดจุดหนึ่งกับจุดแยกอ้างอิง (reference node) โดยทั่วไปมักจะใช้กราวด์ (ground) เป็นจุดแยกอ้างอิง

วิธีการใช้จุดแยกวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า มีดังนี้

1. กำหนดจุดแยกในวงจร ทั้งจุดแยกสำคัญ และจุดแยกอ้างอิง
2. กำหนดทิศของกระแสที่จุดแยกสำคัญ หากกระแสที่ไหลผ่านจุดแยก โดยใช้กฎ KCL
3. เปลี่ยนสมการแสดงกระแสในข้อ 2 ให้อยู่ในรูปความต่างศักย์ไฟฟ้า
จำนวนสมการของความต่างศักย์ที่จุดแยก = จำนวนจุดแยกสำคัญ - 1

ตัวอย่าง 2.12 จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว (ตัวต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม)



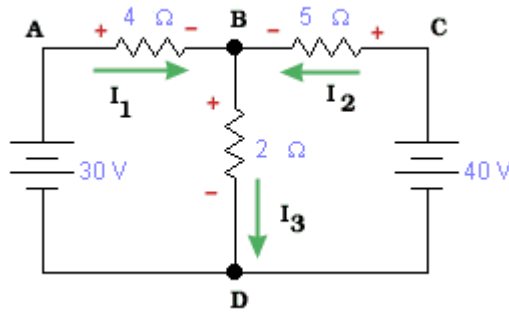
รูป 2.30

วิธีทำ ตัวอย่างนี้ถ้าใช้วิธี กำหนดกระแสในแต่ละวงจะต้องใช้ถึง 2 วง (2 สมการ) ถ้าใช้วิธีวิเคราะห์จุดแยก จะใช้เพียงสมการเดียว

- 1) กำหนด V_D โดยใช้จุด D เป็นจุดอ้างอิง พร้อมทั้งเครื่องหมายบวกลบ กระแส I_3 ซึ่งไหลผ่านตัวต้านทาน 2 โอห์ม จึงมีทิศจาก B ไป D



- 2) กำหนดทิศกระแส I_1, I_2 พร้อมทั้งกำหนดเครื่องหมายบนตัวต้านทาน 4 โอห์ม และ 5 โอห์ม (อย่าลืมว่าทิศของกระแสต้องไหลจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ)



รูป 2.31

- 3). เมื่อพิจารณาจากรูป จะเห็นว่า V_B จะต้องมีค่าน้อยกว่า 30 โวลต์ และ 40 โวลต์ สมการกระแสที่จุด B โดยใช้กฎ KCL คือ

$$I_1 + I_2 = I_3$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 4 โอห์ม คือ $30 - V_B$ จะได้ $I_1 = (30 - V_B)/4$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 5 โอห์ม คือ $40 - V_B$ จะได้ $I_2 = (40 - V_B)/5$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 2 โอห์ม คือ V_B จะได้ $I_3 = V_B/2$

แทนค่า I_1, I_2 และ I_3

$$\frac{30 - V_B}{4} + \frac{40 - V_B}{5} = \frac{V_B}{2}$$

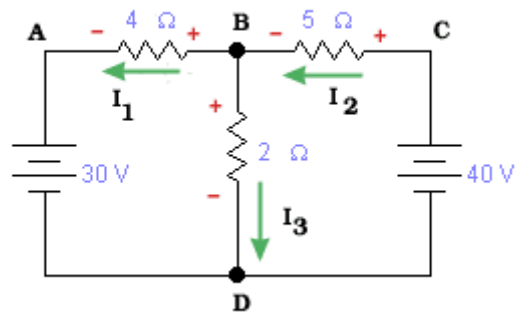
$$V_B = 16.32 \text{ โวลต์}$$

แทนค่า V_B จะได้

$$I_1 = \frac{30 - 16.32}{4} = 3.42 \text{ แอมแปร์}$$

$$I_2 = \frac{40 - 16.32}{5} = 4.74 \text{ แอมแปร์}$$

$$I_3 = \frac{16.32}{2} = 8.16 \text{ แอมแปร์}$$



รูป 2.32

ถ้าเปลี่ยนทิศกระแสเป็นทิศอื่น ผลลัพธ์จะเป็นอย่างไร
ที่จุด B จะได้

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

การเลือกทิศของกระแสแบบนี้แสดงว่า V_B จะต้องน้อยกว่า 40 โวลต์ และมากกว่า 30 โวลต์

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R 4 โอห์ม คือ $V_B - 30$ จะได้ $I_1 = (V_B - 30)/4$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R 5 โอห์ม คือ $40 - V_B$ จะได้ $I_2 = (40 - V_B)/5$

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R 2 โอห์ม คือ V_B จะได้ $I_3 = V_B/2$

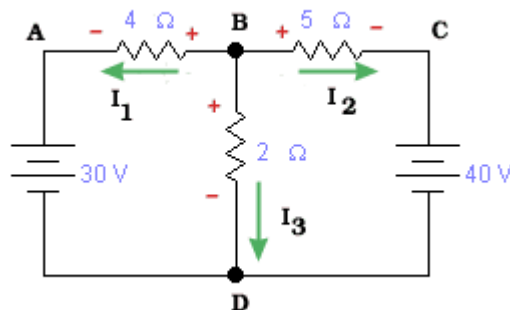
แทนค่า I_1, I_2, I_3

$$\frac{-(V_B - 30)}{4} + \frac{(40 - V_B)}{5} - \frac{V_B}{2} = 0$$

$$V_B = 16.32 \text{ โวลต์}$$

จะได้ $I_1 = -3.42$ แอมแปร์, $I_2 = 4.74$ แอมแปร์, $I_3 = 8.16$ แอมแปร์

ถ้าเปลี่ยนทิศของกระแสเป็นอีกแบบหนึ่ง



รูป 2.33



กรณีนี้ $V_B > 30$ และ $V_B > 40$

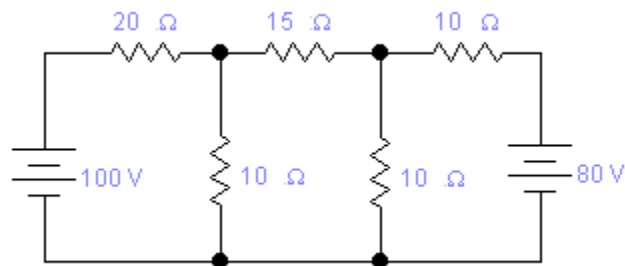
$$\begin{aligned} -I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\ \frac{-(V_B - 30)}{4} - \frac{(V_B - 40)}{5} - \frac{V_B}{2} &= 0 \\ V_B &= 16.32 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_1 = -3.42 \text{ แอมแปร์}, \quad I_2 = -4.74 \text{ แอมแปร์}, \quad I_3 = 8.16$$

แอมแปร์

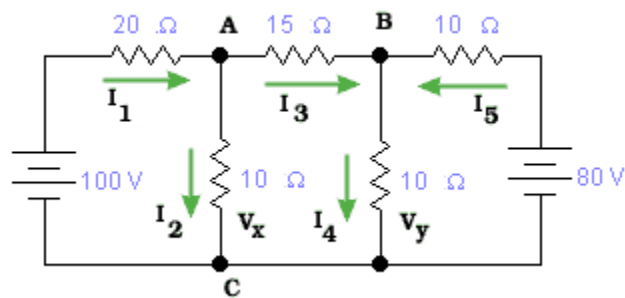
จะเห็นว่า V_B ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางแสที่เรากำหนด

ตัวอย่าง 2.13 จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว



รูป 2.34

วิธีทำ กำหนดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุด A และ B เป็น V_A และ V_B ตามลำดับ โดยวัดเทียบกับจุด C กำหนดทิศของกระแส I_2 และ I_4 ก่อน จึงค่อยกำหนดกระแสที่ตัวต้านทานตัวอื่น



รูป 2.35

ใช้กฎ KCL หากระแสที่ไหลผ่านจุด A และ B



$$\text{ที่จุด A : } I_1 = I_2 + I_3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ที่จุด B : } I_3 + I_5 = I_4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปสมการความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$\text{จากสมการ (1)} \quad \frac{100 - V_y}{20} = \frac{V_y}{10} + \frac{V_y - V_x}{15} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{จากสมการ (2)} \quad \frac{V_y - V_x}{15} + \frac{80 - V_x}{10} = \frac{V_x}{10} \quad \dots\dots\dots (4)$$

จะได้ระบบสมการเชิงเส้น

$$4V_x - 13V_y = -300$$

$$-16V_x + 4V_y = -480$$

แก้สมการหาคำตอบจะได้

$$V_y = 35 \quad \text{โวลต์}$$

$$V_x = 38.75 \quad \text{โวลต์}$$

แทนค่า V_x และ V_y หากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวจะได้

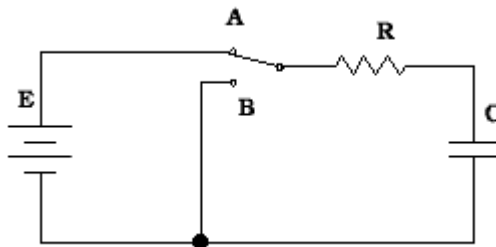
$$I_1 = 3.25 \text{ แอมแปร์}, \quad I_2 = 3.50 \text{ แอมแปร์}, \quad I_3 = -0.25 \text{ แอมแปร์},$$

$$I_4 = 3.875 \text{ แอมแปร์}, \quad I_5 = 4.125 \text{ แอมแปร์}$$

I_3 มีค่าเป็นลบ แสดงว่าทิศของกระแสที่กำหนดไว้ในรูปยังไม่ถูกต้อง ต้องกลับทิศของกระแสเป็นทิศตรงข้าม

2.5 วงจร RC กับแหล่งจ่ายไฟตรง

วงจร RC คือวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน(resistor) และตัวเก็บประจุ (capacitor) วงจรที่มีแต่ตัวต้านทานอย่างเดียว กระแสในวงจรจะมีค่าคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา แต่ถ้ามีตัวเก็บประจุในวงจร กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์จะเปลี่ยนตามเวลา





2.5.11 การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าในวงจร RC

รูป 2.36

วงจร RC ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อกันดังรูป 2.52 เมื่อเลื่อนสวิตช์และที่จุด A จะมีกระแส I ไหลในวงจร ทำให้เกิดประจุสะสมอยู่บนแผ่นทั้งสองของตัวเก็บประจุ ประจุจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ (V_C) เมื่อ V_C มีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า E จะไม่มีกระแสไหลในวงจรอีกต่อไป ประจุที่สะสมบนแผ่นประจุจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $q_0 = EC$

ประจุไฟฟ้า q ที่สะสมบน C ที่เวลาใด ๆ หาได้โดยอาศัยกฎ KVL

$$\begin{aligned} V_R + V_C &= E \\ IR + \frac{q}{C} &= E \\ \frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC}q &= \frac{E}{R} \end{aligned}$$

หาคำตอบสมการดิฟเฟอเรนเชียล โดยใช้ integrating factor $e^{t/RC}$ คูณเข้าไปทั้งสองข้าง แล้วใช้เงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อ $t = 0$, $q = 0$ จะได้คำตอบของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} q &= EC(1 - e^{-t/RC}) \\ &= q_0(1 - e^{-t/RC}) \dots\dots\dots(2.6) \end{aligned}$$

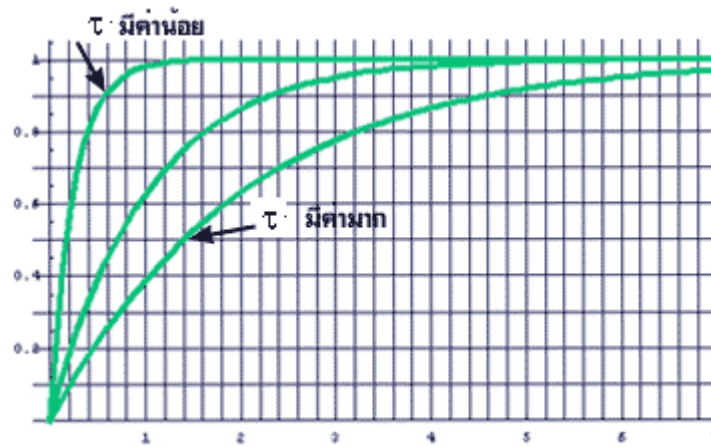
จากสมการจะเห็นว่า $e^{-t/RC}$ จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ประจุบนตัวเก็บประจุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อ t ผ่านไปนานมาก ๆ ($t \rightarrow \infty$) ประจุบนตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงสุด $= q_0$

ให้ τ เป็นค่าคงที่เวลา (time constant) โดยที่ $\tau = RC$

เมื่อ $T = \tau = RC$ จะได้

$$q = q_0(1 - e^{-1}) = 0.63 q_0$$

ค่าคงที่เวลาของวงจร RC คือ เวลาที่ใช้ในการสะสมประจุบนตัวเก็บประจุจนมีค่าเป็น 63% ของค่าสูงสุด ถ้าค่าคงที่ของเวลาสั้นสามารถสะสมประจุได้เร็ว ถ้าค่าคงที่เวลายาวนานจะใช้เวลานานในการประจุให้เต็ม



รูป 2.37 การประจุบน C เมื่อค่า คงที่เวลาต่างกัน

กระแสไฟฟ้าในวงจร (I) หาได้จาก $\frac{dq}{dt}$

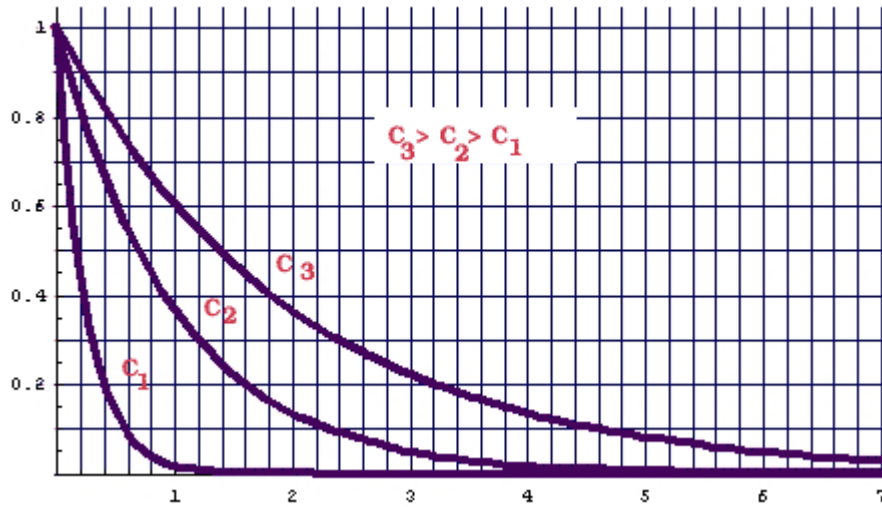
$$I = \frac{E}{R} e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \dots\dots\dots(2.7)$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่อ $t = 0$ กระแสในวงจรจะมีค่าสูงสุด คือ $\frac{E}{R}$ เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ กระแสจะลดลงจนเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติจะถือว่ากระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ได้เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ 7τ

แทนค่า t ด้วยค่าคงที่เวลา $= RC$ จะได้

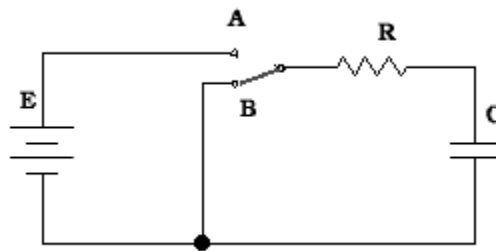
$$I = 0.37 I_0$$

อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าค่าคงที่เวลาของวงจร RC คือช่วงเวลาที่ทำให้กระแสสูงสุดในวงจรลดเหลือ 37% ของค่าเดิม



รูป 2.38 การลดลงของกระแส เมื่อค่า C ต่างกัน

เมื่อตัวเก็บประจุมีประจุเต็มที่แล้ว ย้ายสวิตช์มาแตะที่จุด B ตัวเก็บประจุจะคายประจุ (discharge) ผ่านตัวต้านทาน ทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าจะตรงข้ามกับทิศเดิม



รูป 2.39 เมื่อสลับสวิตช์มาที่ B

ต้องการหาประจุและกระแสไฟฟ้าในวงจร

$$IR + \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC}q = 0$$

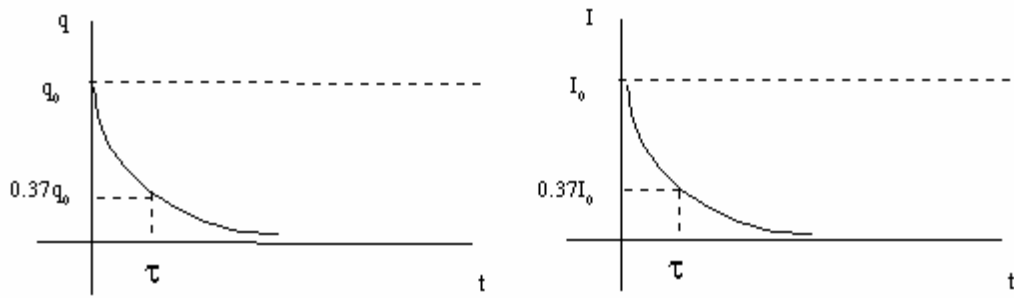
จะได้คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ คือ

$$q = q_0 e^{-t/RC}$$

กระแสไฟฟ้าในวงจร คือ

$$I = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \dots\dots(2.8)$$

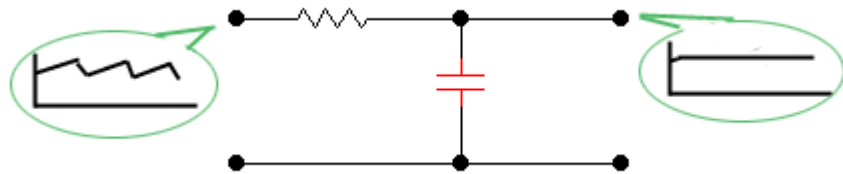
เครื่องหมายลบแสดงว่ากระแสไหลเข้าสวนทิศกับครั้งแรก ปริมาณประจุและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



รูป 2.40 การลดลงของประจุและกระแสไฟฟ้า

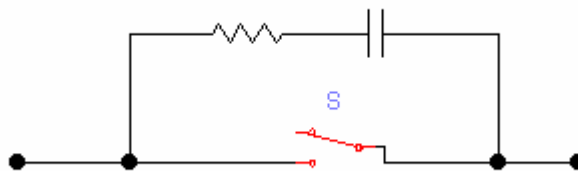
2.5.2 การนำวงจร RC ไปใช้งาน

วงจร RC ใช้ในวงจรกรองกระแสใน แหล่งจ่ายตรง กระแสตรงมีค่าไม่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านวงจร RC ตัวเก็บประจุจะคายประจุตรง บริเวณที่มีกระแสน้อยกว่าปกติ และจะสะสมประจุเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าปกติ



รูป 2.41 การใช้วงจร RC กรองกระแสไฟฟ้า

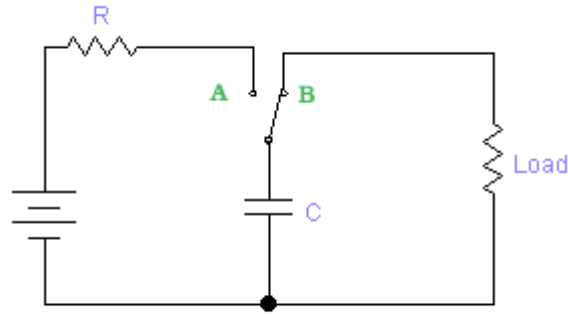
วงจร RC ใช้ป้องกันการเกิดประกายไฟ เนื่องจากการสัมผัสหรือแยกกันของหน้าสัมผัสทั้งสองของสวิตช์ ขณะที่หน้าสัมผัสของสวิตช์ S แยกออกจากกัน ตัวเก็บประจุจะดูดพลังงานซึ่งเกิดจากการอาร์ค (arc) ของหน้าสัมผัสทำให้สวิตช์มีอายุการใช้งานนานขึ้นป้องกันการหลอมละลายของหน้าสัมผัส



รูป 2.42 การใช้วงจร RC ป้องกันการเกิดประกายไฟ



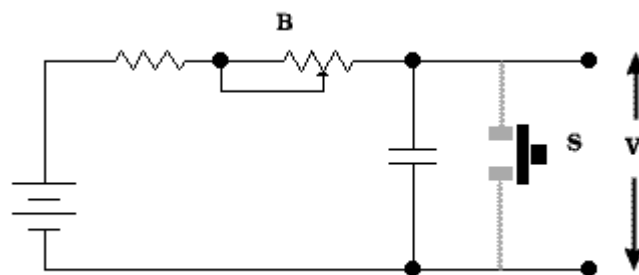
ตัวต้านทาน R จะจำกัดกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ขณะที่สวิตช์ต่อวงจร หรือหน้าสัมผัสแตะกัน วงจร RC ใช้ในการสะสมพลังงานจากรูป 2.42 S เป็นสวิตช์แบบ SPDT (Single Pole Double Throw switch) สมมติว่าต้องใช้เวลา 8 วินาที เพื่อจะสะสมพลังงานขนาด 50 จูลที่ตัวเก็บประจุ เพื่อใช้กับไฟแฟลชของกล้องถ่ายรูป เมื่อสวิตช์ตัดกลับไปที่ B พลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ที่ตัวต้านที่เป็น load ซึ่งเป็นโหลดไฟแฟลช หลอดนี้ใช้พลังงานทั้งหมดไปใน 1 มิลลิวินาที กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $= 50$ กิโลวัตต์



รูป 2.43 การใช้วงจร RC สะสมพลังงาน

เรานำหลักการนี้ไปสร้างเครื่องมือที่ต้องการให้เกิดพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ (short duration megawatt pulse of energy) เช่น อุปกรณ์ในเครื่องเรดาร์ หัวแรงระเบิดที่ใช้เชื่อมงานเฉพาะจุด

วงจร RC สามารถนำไปใช้เป็นตัวหน่วงเวลา โดยอาศัยการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ



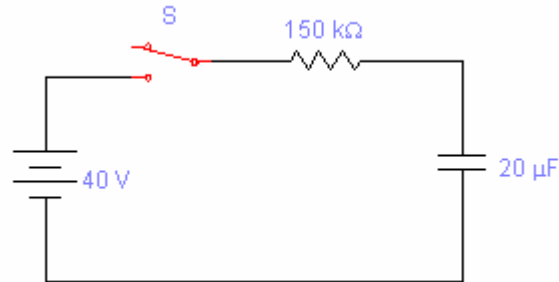
รูป 2.44 การใช้วงจร RC หน่วงเวลา

เมื่อกดสวิตช์ S ตัวเก็บประจุจะคายประจุจนหมด เป็นการตั้งเวลาใหม่ (reset) เมื่อ S ถูกปล่อย ความต่างศักย์ที่ขั้วทั้งสองของตัวเก็บประจุ (V_C) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้



คือ V ซึ่งใช้กระตุ้นให้อุปกรณ์อื่นทำงาน วงจรนี้จึงเป็นตัวหน่วงเวลา (time delay) โดยเว้นช่วงชั่วระยะเวลาหนึ่งหลังจากกดสวิตช์ อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงกับ V จึงเริ่มทำงาน

ตัวอย่าง 2.14 จะเป็นเวลานานเท่าใด ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงจะมีค่า 25 โวลต์ โดยเริ่มนับเวลาจากกดสวิตช์ S



รูป 2.45

วิธีทำ

$$V_C = \frac{q}{c} = E(1 - e^{-t/RC})$$

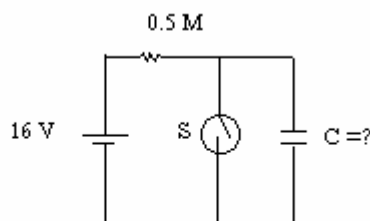
แทนค่า $V_C = 25$ โวลต์, $E = 40$ โวลต์

$$25 = 40(1 - e^{-t/(150 \times 10^3)(20 \times 10^{-6})})$$

$$e^{-t/3} = 0.375$$

$$t = 2.94 \text{ วินาที}$$

ตัวอย่าง 2.15 เครื่องตั้งเวลาเครื่องหนึ่งใช้วงจร RC เป็นตัวนับเวลา วงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ 16 โวลต์ ตัวต้านทาน 0.5 เมกกะโอห์ม สวิตช์ของเครื่องตั้งเวลาจะทำงานเมื่อมีความต่างศักย์ตกคร่อม C เท่ากับ 6 โวลต์ จงหาค่า C ที่ทำให้สวิตช์ทำงานเมื่อเวลาผ่านไป 6 วินาที



รูป 2.46



วิธีทำ เมื่อวงจรตั้งเวลาเริ่มทำงาน ตัวเก็บประจุจะสะสมประจุไว้ที่แผ่นของตัวเก็บประจุ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะสูงขึ้นเรื่อย จนกระทั่งมีค่า 6 โวลต์ สวิตช์ S จึงจะเริ่มทำงาน ต้องการให้สวิตช์ทำงานในเวลา 6 วินาที จากสูตร

$$V_C = E(1 - e^{-t/RC})$$

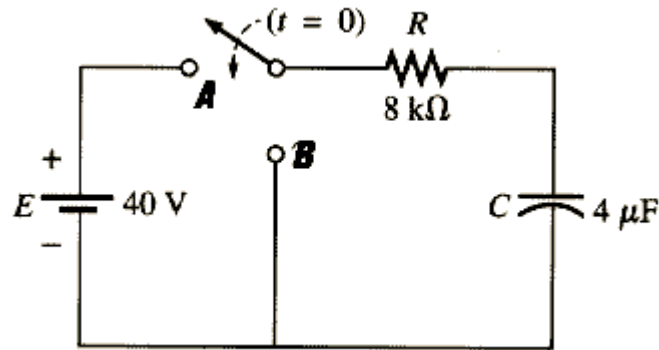
$$6 = 16(1 - e^{-6/.05 \times 10^6 \times C})$$

ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 25.5 ไมโครฟารัด

ตัวอย่าง 2.16 ก. เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง A จงเขียนสมการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (V_R) และตัวเก็บประจุ (V_C) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (I_C)

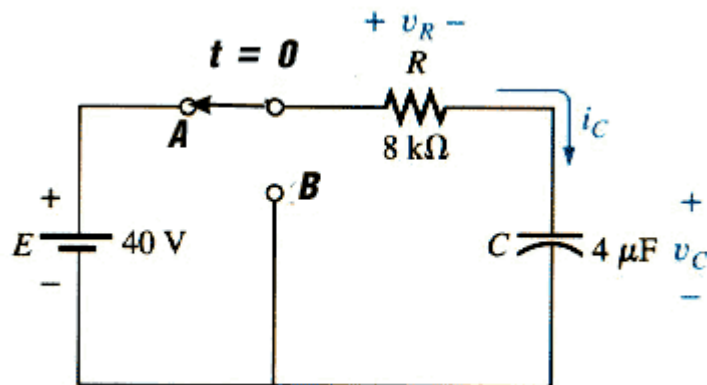
ข. ในทางปฏิบัติจะใช้เวลานานเท่าใดจึงจะทำให้ $V_C = E$, $I_C = 0$

ค. เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง B จงเขียนสมการ V_C , I_C และ V_R ให้ $t = 0$ เมื่อสวิตช์แตะที่จุด B



รูป 2.47

วิธีทำ เมื่อสวิตช์แตะที่จุด A เริ่มต้นเป็นเวลาที่ $t = 0$ ทิศของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานและ ตัวเก็บประจุเป็นดังรูปที่ 2.48



รูป 2.49 แสดงทิศกระแสและเครื่องหมายความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์



ก. ค่าคงที่ของเวลาของวงจร $\tau = RC = (8 \times 10^3 \text{ Ohm})(4 \times 10^{-6} \text{ F}) = 32 \text{ ms}$
 จากสมการ $q = CE(1 - e^{-t/RC})$
 $V_C = q/C = E(1 - e^{-t/RC})$

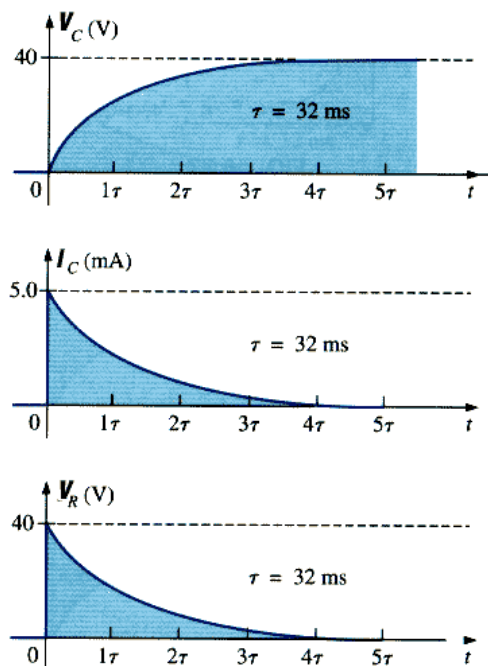
แทนค่า E และ τ จะได้ $V_C = 40(1 - e^{-t/32 \times 10^{-3}})$ โวลต์

กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $I_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} = \frac{40\text{V}}{8\text{k}\Omega} e^{-t/\tau}$
 $= 5e^{-t/32 \times 10^{-3}} \text{ mA}$

ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $V_R = I_R R = I_C R = E e^{-t/\tau}$
 $= 40e^{-t/\tau} \text{ V}$

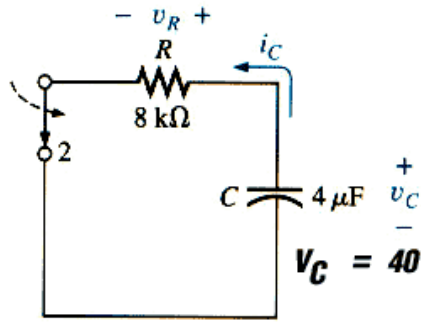
ข. จากกราฟจะเห็นว่ากระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเป็นศูนย์ และ $V_C \approx E$ เมื่อ $t > 5\tau$ ขึ้นไป

$$t = 5\tau = 5 \times (32 \text{ ms}) = 160 \text{ ms}$$



รูป 2.50 กราฟแสดงปริมาณต่าง ๆ ระหว่างการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

ค. เมื่อคายประจุ ทิศทางของกระแสในวงจร และเครื่องหมายความต่างศักย์ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ จะเป็นดังรูป 2.51



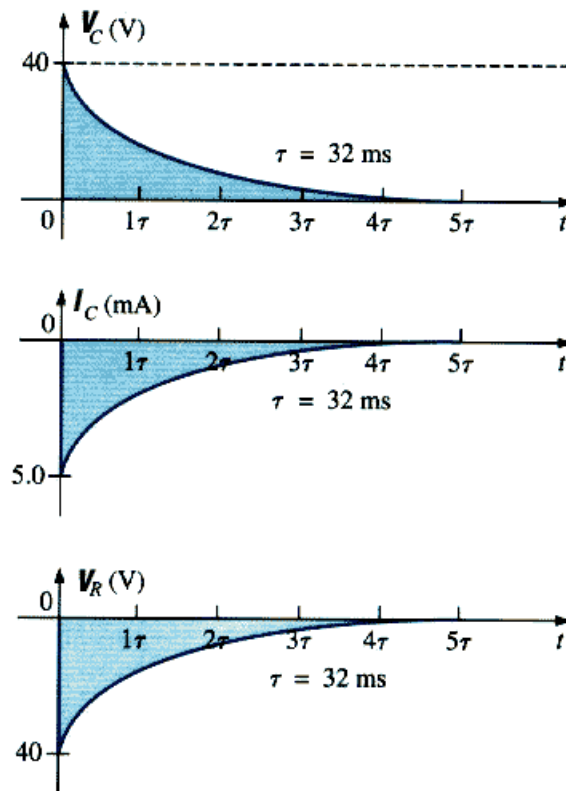
รูป 2.51 เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุ ทิศของกระแสจะสวนกับทิศเมื่อเก็บประจุ

$$V_C = E e^{-t/\tau} = 40 (e^{-t/32 \times 10^{-3}}) \text{ V}$$

$$I_C = -\frac{E}{R} e^{-t/\tau} = -5 \times 10^{-3} (e^{-t/32 \times 10^{-3}}) \text{ A}$$

$$V_R = -E e^{-t/\tau} = -40 (e^{-t/32 \times 10^{-3}}) \text{ V}$$

เมื่อพล็อตกราฟ V_C I_C และ V_R จะได้ดังรูปที่ 2.52



รูป 2.52 กราฟแสดง ความต่างศักย์และกระแสที่ C ความต่างศักย์ที่ R เทียบกับเวลา t

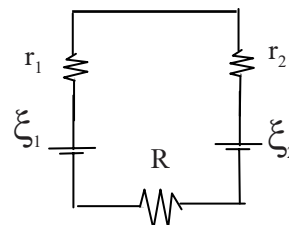


แบบฝึกหัดหน่วยที่ 2

ไฟฟ้ากระแสตรง

- 2.1 ลวดทองแดงและลวดเหล็กมีความยาวเท่ากัน ต่างต่อเข้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน
- ก. จงหาอัตราส่วนของรัศมีของขดลวดทั้งสอง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดทั้งสองเป็นปริมาณเท่ากัน ให้สภาพความต้านทานของทองแดงและเหล็ก เป็น 1.7×10^{-8} และ 12×10^{-8} โอห์ม.เมตร ตามลำดับ (2.66 เท่า)
- ข. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากันหรือไม่ ถ้าจะให้เท่ากันควรทำอย่างไร (ไม่, ต้องทำให้พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)
- 2.2 กระแสขนาด 5 แอมแปร์ ไหลผ่านขดลวดความต้านทาน 10 โอห์มเป็นเวลา 4 นาที
- ก. จงหาขนาดของประจุ (1.2×10^3 คูลอมป์)
- ข. จำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านพื้นที่ภาคตัดขวาง (7.5×10^{11} ตัว)
- 2.3 แท่งอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาว 1 เมตร ขอบหนา 5 มิลลิเมตร จงหาความต้านทานระหว่างปลายทั้งสอง ถ้าต้องการทองแดงยาว 1 เมตรที่มีความต้านทานเท่ากัน จะต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่าไร ให้สภาพความต้านทานของอลูมิเนียม 2.6×10^{-8} โอห์ม.เมตร (0.104×10^{-12} โอห์ม, 4.56 มิลลิเมตร)
- 2.4 ลวดความต้านทาน 6 โอห์ม ถูกดึงให้มีความยาวเพิ่มเป็น 3 เท่าของของเดิม จงหาความต้านทานของลวดเส้นใหม่นี้ สภาพความต้านทานและความหนาแน่นของเนื้อโลหะไม่เปลี่ยนแปลง (54 โอห์ม)
- 2.5 กระแสไฟฟ้าขนาด 10^{-10} แอมแปร์ ไหลในลวดทองแดง ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 เซนติเมตร จงหาอัตราเร็วล่องลอย (drift speed) ของอิเล็กตรอน (1.5×10^{-19} เมตร/วินาที)
- 2.6 จงบอกความแตกต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมันเป็นเท่ากันหรือไม่ เป็นไปได้หรือไม่ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแบตเตอรี่จะมากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

- 2.7 ให้ $\xi_1 = 2$ โวลต์, $\xi_2 = 3$ โวลต์,
 $r_1 = r_2 = 3$ โอห์ม กระแสในวงจรเท่ากับ
 0.001 แอมแปร์ จงหาค่า R และพลังงานไฟฟ้า
 ที่เปลี่ยนเป็นความร้อน (1006 โอห์ม, 10^{-6} วัตต์)

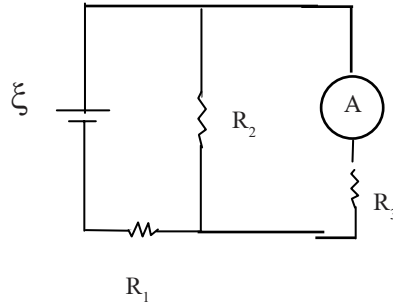


รูปสำหรับข้อ 2.7



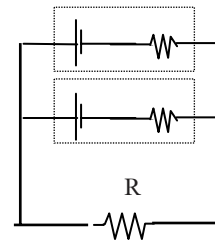
- 2.8 แอมมิเตอร์จะอ่านกระแสได้เท่าใด ถ้า $\xi = 5$ โวลต์ $R_1 = 2$ โอห์ม $R_2 = 4$ โอห์ม $R_3 = 6$ โอห์ม

รูปสำหรับข้อ 2.8



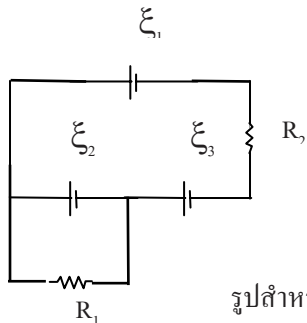
- 2.9 แบตเตอรี่ 2 ชุด แต่ละชุดมีความต้านทานภายในเท่ากับ r มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ ξ
 ก. จงหา R ที่จะทำให้เกิดกำลังงานที่ R มากที่สุด
 ข. จงหา กำลังงานที่มากที่สุดนี้

รูปสำหรับข้อ 2.9, 2.10



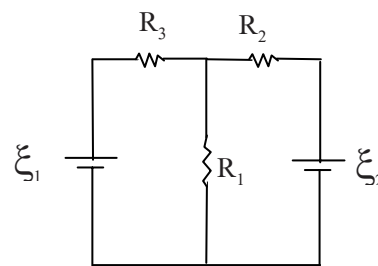
- 2.10 จากข้อ 2.9 ถ้าเปลี่ยนการต่อแบตเตอรี่ให้เป็นแบบอนุกรม จงเขียนสมการแสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R และแบบไหนจะให้กระแสมากกว่ากัน ถ้า ก. $R > r$ ข. $R < r$

- 2.11 จงหากระแสและความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานแต่ละตัว ให้ $\xi_1 = 6$ โวลต์, $\xi_2 = 5$ โวลต์, $\xi_3 = 4$ โวลต์, $R_1 = 100$ โอห์ม และ $R_2 = 50$ โอห์ม



รูปสำหรับข้อ 2.11

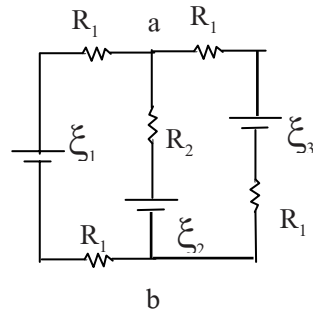
- 2.12 ก. จงหาพลังงานที่กลายเป็นความร้อนใน

 R_1, R_2 และ R_3 ข. จงหาพลังงานที่ ξ_1 และ ξ_2 เสียไปค. ให้ $\xi_1 = 3$ โวลต์, $\xi_2 = 1$ โวลต์ $R_1 = 5$ โอห์ม $R_2 = 2$ โอห์ม และ $R_3 = 4$ โอห์ม

รูปสำหรับข้อ 2.12



2.13

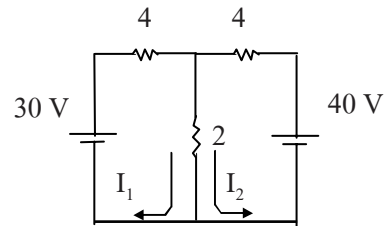


รูปสำหรับข้อ 2.13

ก. จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว

ข. จงหา V_{ab} ให้ $\xi_1 = 2$ โวลต์ $\xi_2 = \xi_3 = 4$ โวลต์ $R_1 = 1$ โอห์ม $R_2 = 2$ โอห์ม2.14 จงหากระแส I_1 และ I_2

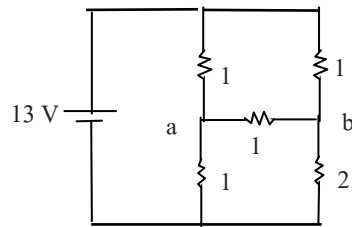
(3.125 A, 5.625 A)



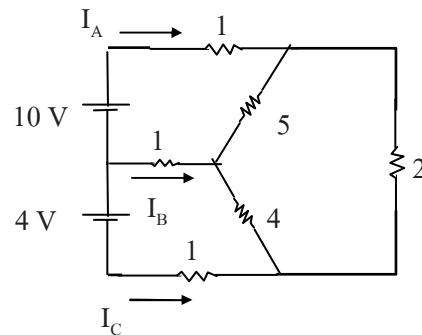
รูปสำหรับข้อ 2.14

2.15 จงหากระแสไฟฟ้ารวมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ab

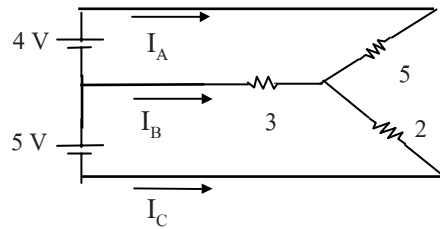
(11 A, 1 A)



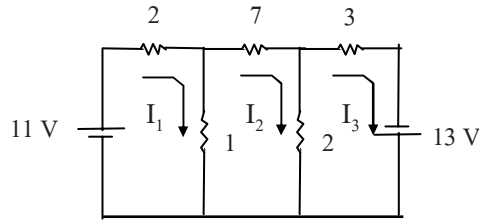
รูปสำหรับข้อ 2.15

2.16 จงหา I_A , I_B และ I_C ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นโอห์ม($I_A = 4.188$ A, $I_B = 0.711$ A, $I_C = 3.477$ A)

รูปสำหรับข้อ 2.16

2.17 จงหา I_A , I_B และ I_C $(I_A = 1.129 \text{ A}, I_B = 0.548 \text{ A} \text{ และ } I_C = 1.677 \text{ A})$ 

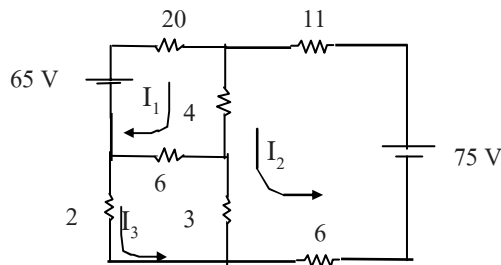
รูปสำหรับข้อ 2.17

2.18 จงหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3 $(I_1 = 4 \text{ A}, I_2 = 1 \text{ A} \text{ และ } I_3 = 3 \text{ A})$ 

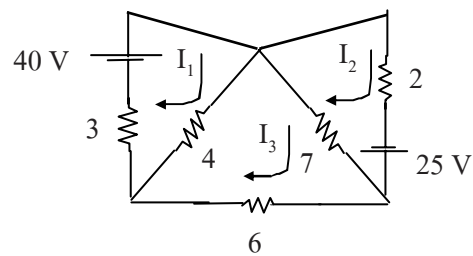
รูปสำหรับข้อ 2.18

2.19 จงหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3 $(I_1 = 5.21 \text{ A}, I_2 = 3.46 \text{ A} \text{ และ } I_3 = -1.90 \text{ A})$

รูปสำหรับข้อ 2.19

2.20 จงหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3 $(I_1 = 8.322 \text{ A}, I_2 = 6.327 \text{ A} \text{ และ } I_3 = 4.563 \text{ A})$

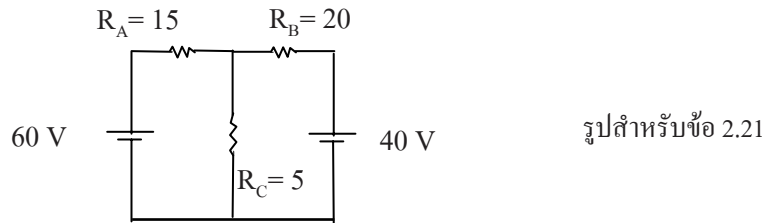
ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นโอห์ม



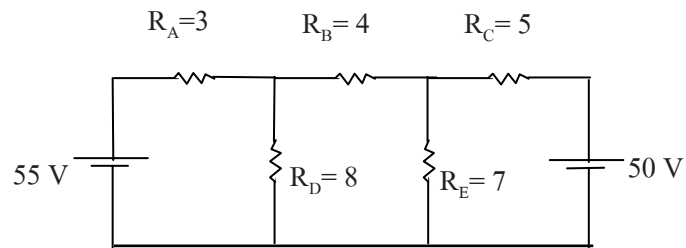
รูปสำหรับข้อ 2.20



2.21 จงใช้วิธี nodal analysis หากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นโอห์ม (2.74 A, 1.05 A, 3.79 A)

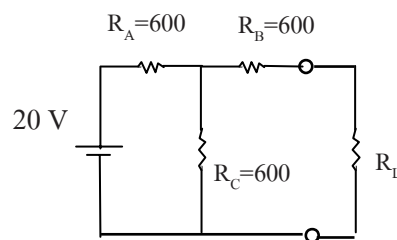


2.22 จงใช้วิธี nodal analysis หากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว ตัวต้านทานทุกตัวมีหน่วยเป็นโอห์ม (5.8660 A, 1.1907 A, 4.6753 A, 3.4721 A, 4.6628 A)



รูปสำหรับข้อ 2.22

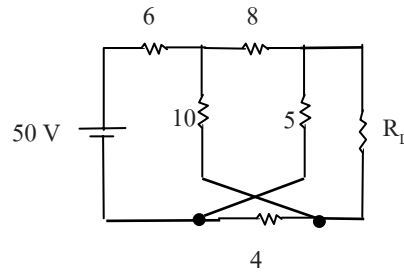
2.23 จงคำนวณหาค่า R_L ซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนตัวต้านทาน R_L นี้ และจงหาค่ากำลังไฟฟ้าค่านี้ด้วย ตัวต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (27.8 W)



รูปสำหรับข้อ 2.23

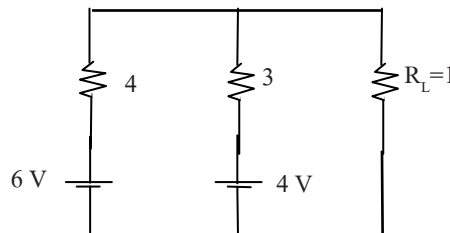


2.24 จงคำนวณหาค่า R_L ซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดบนตัวต้านทาน R_L นี้ (6.67 โอห์ม)



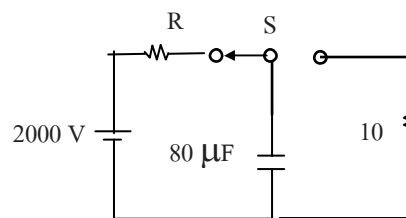
รูปสำหรับข้อ 2.24

2.25 จงเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟแรงดันคงที่ให้เป็นแบบกระแสคงที่ และหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน 1 โอห์ม (1.79 A)



รูปสำหรับข้อ 2.25

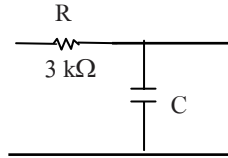
2.26 เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุจนมีประจุเต็มที่แล้ว สับสวิตช์กลับมายังตัวต้านทาน 10 โอห์ม จงหากระแสเริ่มต้นในตัวต้านทาน ถ้า 95% ของพลังงานถูกใช้ที่ตัวต้านทานในเวลา 2τ วินาทีและจงหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยบนตัวต้านทาน (10 A, 667 kW)



รูปสำหรับข้อ 2.26



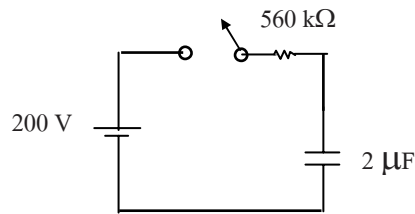
- 2.27 เวลาที่กระแสใช้ในการเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด (rise time) มีค่า 4 ns จงหาค่า C ในวงจร (0.579 pF)



รูปสำหรับข้อ 2.27

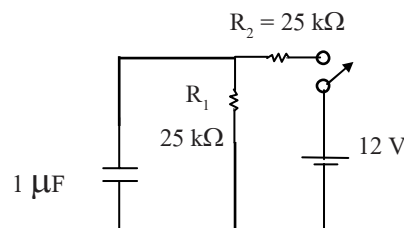
- 2.28 จากข้อ 2.27 ถ้า rise time (95 % ของค่าสูงสุด) ในวงจรไม่เกิน 2.4 ns $C = 12$ pF ตัวต้านทานมีค่าได้มากที่สุดไม่เกินเท่าใด

- 2.29 จงหาค่า V_C เมื่อเวลา 1/10, 1/5, 1/2, 1, 2 และ 5 วินาที โดยนับเวลาตั้งแต่สวิตช์เริ่มแตะกัน



รูปสำหรับข้อ 2.29

- 2.30 เมื่อเริ่มสับสวิตช์ ($t = 0$) จงหากระแสเริ่มต้นและศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ตัวต้านทานแต่ละตัว และ ตัวเก็บประจุ (0.48 mA, 12 V ที่ R_1 และ R_2)
เมื่อตัวเก็บประจุเก็บประจุจนเต็มแล้ว จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวและที่ตัวเก็บประจุ (ที่ R_1 0.48 mA, 12 V ที่ R_2 0 A, 0 V ที่ C 0 mA, 12 V)



รูปสำหรับข้อ 2.30

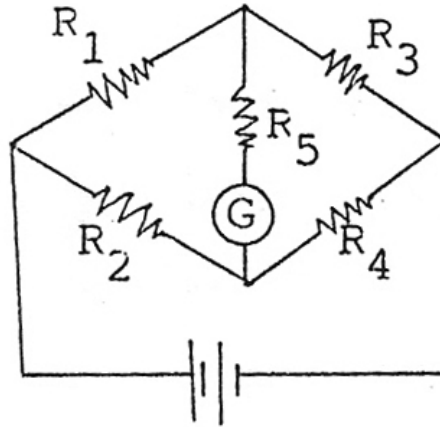


แบบฝึกหัดหน่วยที่ 2 (เพิ่มเติม)

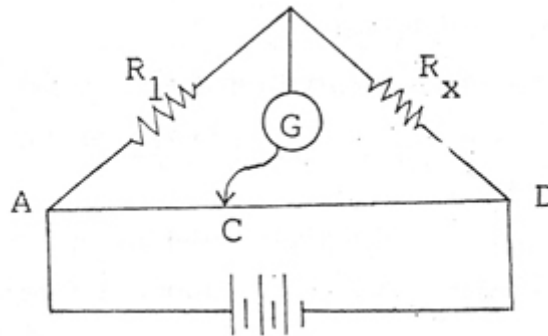
1. ความต้านทานของพลาตินัมมีค่า 6 โอห์ม ที่ 30°C จงหาค่าความต้านทานที่ 100°C ถ้า ส.ป.ส. อุณหภูมิของความต้านทานของพลาตินัมมีค่าเท่ากับ $0.00392 / ^{\circ}\text{C}$
2. ตามแบบอะตอมของบอร์ อะตอมของไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตอนอยู่ตรงกลางและมีอิเล็กตรอนล้อมรอบ ถ้าพบว่าอิเล็กตรอนวิ่งรอบโปรตอนด้วยความเร็ว 0.6×10^{16} รอบ ต่อ วินาที กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการวิ่งของอิเล็กตรอนนี้มีค่าเท่าไร
3. เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทาน ปรากฏว่าเกิดความร้อนในความต้านทานขนาด 10 โอห์ม ซึ่งต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 15 โวลต์ด้วยอัตรา 10 วัตต์ จงหาความต้านทานภายในของ แบตเตอรี่
4. โรงงานใช้พลังงาน 55.0 กิโลวัตต์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 2200 โวลต์ ที่อยู่ห่างออกไประยะหนึ่ง ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเนื่องจากสายไฟฟ้ามี่ค่า 10 โวลต์ จะเสียพลังงานในสายไฟ ไปเท่าไร
5. เต้าไฟฟ้าขนาด 660 วัตต์, 220 โวลต์ ต้องการกระแสเท่าใด เกิดความร้อนกี่แคลอรีต่อวินาที และถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าลดเหลือ 110 โวลต์ เต้าไฟฟ้าจะมีกำลังเท่าใด (สมมติให้ค่าความต้านทานคงที่)
6. ลวดความต้านทานชนิดจุ่ม มีความต้านทาน 50 โอห์ม มีกระแสไฟฟ้าไหล 2.5 แอมแปร์ ถ้าจุ่ม ลงไปในน้ำจำนวน 1500 กรัม เป็นเวลานาน 3 นาที ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 20 องศา เซนติเมตร จงหาอุณหภูมิสุดท้าย ถ้าความร้อนไม่สูญเสียไปในทางอื่นเลย
7. ถ้าใช้เตารีดไฟฟ้าขนาด 1000 W, 220 V เดือนละ 5 ครั้ง ๆ ละ 3 ชั่วโมง หลอดไฟฟ้า 100 W, 110 V 2 หลอดต่ออนุกรมกันแล้วจึงไปเสียบปลั๊ก 220 V และหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 W, 220 V 5 หลอด เป็นเวลาวันละ 10 ชั่วโมงเดือนละ 30 วัน ถ้าค่าไฟฟ้ายูนิตละ 90 สตางค์ จะต้องเสียค่าไฟฟ้าประมาณเดือนละเท่าไร
8. มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์, 5 แอมแปร์, 1.25 กำลังม้า มีประสิทธิภาพเท่าไร ถ้าใช้งานวัน ละ 5 ชั่วโมง เดือนละ 30 วัน จะเสียค่าไฟเดือนละเท่าไร ถ้าค่าไฟยูนิตละ 1 บาท
9. กระแสขนาดคงที่ 5 แอมแปร์ ไหลในเส้นลวดตัวนำนาน 2 นาที ประจุที่ไหลในเส้นลวดจะเกิด จากอิเล็กตรอนกี่ตัว
10. ลวดเงินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. มีประจุไฟฟ้าผ่าน 90 คูลอมบ์ในเวลา 1 ชม. 15 นาที ถ้าเงินมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ 5.8×10^{22} ตัวต่อ ลบ. ซม. จงหาความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนนี้ เป็นเมตร / วินาที



11. วงจรดังรูปข้างล่างนี้เรียกว่าวงจรวีตสโตน (Wheatstone Bridge) จากการปรับค่าความต้านทานตัวที่ 1, 2, 3 ให้มีค่า 1, 2, 3 โอห์มตามลำดับ จงหาว่าจำเป็นต้องปรับค่าความต้านทานตัวที่ 4 ให้มีค่าเท่าใดจึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านกัลวานอมิเตอร์มีค่าเป็นศูนย์



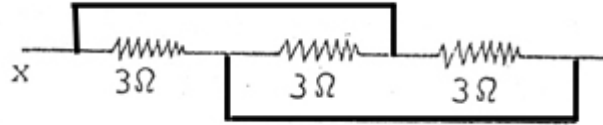
12. ตามวงจรมอบข้อที่แล้วจงหาว่าเมื่อปรับจลน์สมดุลค่าความต้านทานตัวที่ 5 ในรูปจะต้องมีค่าเท่าไร
13. ตามวงจรมอบรูปข้างล่างนี้ ความต้านทาน R_1 มีค่า 10 โอห์ม และความต้านทาน R_x เป็นความต้านทานที่ไม่ทราบค่า AD เป็นเส้นลวดมีขนาดสม่ำเสมอทำด้วยโลหะชนิดเดียวกันตลอด เมื่อนำ กัลวานอมิเตอร์ไปต่อระหว่าง B กับ C พบว่าเมื่อเส้นลวด AD ยาว 1 เมตร และระยะ AC เท่ากับ 25 ซม. จะไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่านกัลวานอมิเตอร์ค่าความต้านทานมีค่าเท่าไร



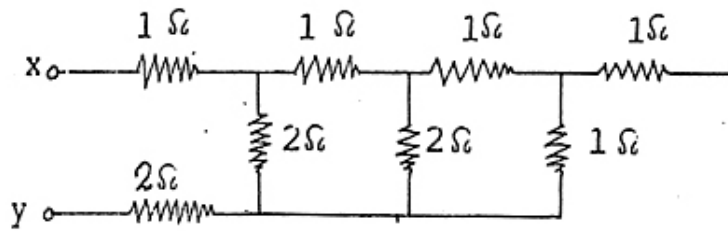
14. เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 200 โวลต์ ผ่านความต้านทานขนาด 100 โอห์ม เป็นเวลา 5 วินาที จะมีประจุไฟฟ้าผ่านความต้านทานนี้เท่ากับเท่าใด
15. ลวดสองเส้น ลวดเส้นแรกมีความยาวเป็นสองเท่ามีพื้นที่หน้าตัดเป็น 4 เท่าและมีค่าสภาพความต้านทานเป็นสามเท่า ของเส้นที่สอง ถ้าเส้นแรกมีค่า 3 โอห์ม เส้นที่สองมีค่ากี่โอห์ม



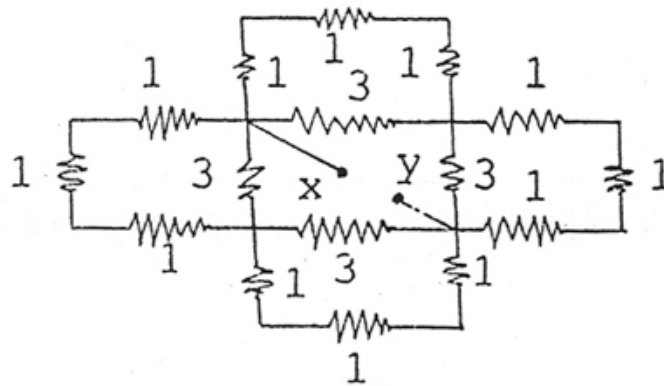
16. ลวดเหล็ก, ลวดทองแดง และลวดตะกั่ว สามเส้นต่างมีค่าความต้านทานเท่า ๆ กัน ถ้าทราบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเหล็กมีค่าเป็นสองเท่าของลวดทองแดง มีค่าสภาพความต้านทานเป็นหกเท่าของทองแดง และลวดตะกั่วมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นสองเท่าของลวดเหล็ก มีค่าสภาพความต้านทานเป็นสองเท่าของเหล็ก อัตราส่วนของความยาวของลวดทั้งสามคือเท่าใด
17. ลวดสังกะสียาว 10 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 0.5 ตร.มม. มีค่าความต้านทาน 2.8 โอห์ม ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสังกะสีเป็นซีเมนต์ต่อเมตร เป็นเท่าใด
18. ความต้านทานรวมของรูปข้างล่างนี้มีค่ากี่โอห์ม



19. ความต้านทานรวมของรูปข้างล่างนี้มีค่ากี่โอห์ม



20. ความต้านทานรวมของรูปข้างล่างนี้มีค่ากี่โอห์ม



21. ความต้านทานรวมของรูปข้างล่างนี้มีค่ากี่โอห์ม

