

## บทที่ 8

### ทฤษฎีของเทเวนิน

วิธีการคำนวณหาค่ากระแสไหลผ่านค่าความต้านทานใด ๆ สามารถใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์วิเคราะห์วงจรโดยได้กล่าวอย่างละเอียดผ่านมาแล้วในบทที่ 7 โดยการนำกฎของเคอร์ชอฟฟ์มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการทราบค่าในวงจร โดยการวิเคราะห์การไหลของกระแสในแต่ละลูป (Loop) ต่าง ๆ ของวงจร และการสร้างสมการโดยอาศัยกฎกระแสและแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ พร้อมเขียนสมการให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ตามบริบทของวิธีนั้น ๆ จากการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ต้องการนั้นจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนพอสมควรในการหาค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการทราบค่าในวงจร ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะหมดไปหากใช้วิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของเทเวนินในการแก้ปัญหา วิธีการวิเคราะห์วงจรตามทฤษฎีของเทเวนินหากต้องการทราบค่าในวงจร เช่น การหาค่ากระแสไหลผ่านค่าความต้านทานตัวใดก็ตามสามารถทำได้โดยการปลดค่าความต้านทานตัวนั้นออกจากวงจรซึ่งจะสามารถคำนวณค่าแรงดันและกระแสได้รวดเร็วมากขึ้น โดยสาระสำคัญเนื้อหาในบทเรียนนี้เป็นการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าตามทฤษฎีของเทเวนินซึ่งจะทำให้ผู้เรียนสามารถคำนวณค่าแรงดันตกคร่อมแต่ละจุดได้ด้วยวิธีการปลดค่าความต้านทานออกจากระบบเรียกว่า แรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) และค่าความต้านทานเทียบเท่า ณ จุดที่ทำการปลดค่าความต้านทานนั้นออกจากวงจรเรียกว่า ความต้านทานเทเวนิน ( $R_{Th}$ ) และผู้เรียนสามารถเขียนวงจรสมมูลของเทเวนินได้

### ทฤษฎีของเทเวนิน

ทฤษฎีของเทเวนิน (Thevenin's Theorem) เป็นทฤษฎีหนึ่งที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง ได้มีการพัฒนาทฤษฎีขึ้นในปี ค.ศ. 1883 ซึ่งมีผู้คิดค้นชื่อว่า เอ็ม. แอล. เทเวนิน (M.L. Thevenin) เป็นวิศวกรชาวฝรั่งเศส (สัญชาติ ตั้งวงศ์ศานต์ และคณะ. 2556 : 231) และได้มีผู้กล่าวถึงทฤษฎีของเทเวนิน มีดังนี้

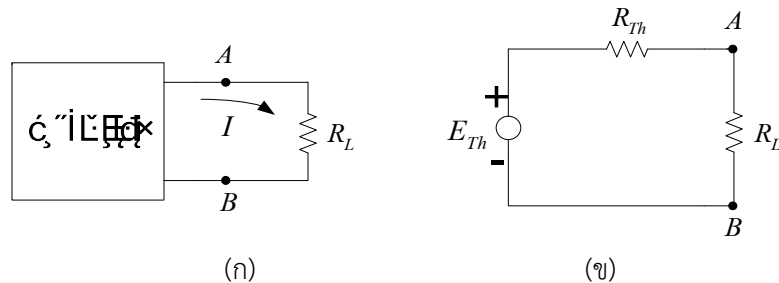
ซัด อินทะสี (2553 : 277) กล่าวว่า วงจรไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงจรลิเนียร์หรือวงจรแบบเชิงเส้นใด ๆ สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลเทเวนินซึ่งจะประกอบไปด้วยแรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) ต่ออนุกรมกับความต้านทานเทเวนิน ( $R_{Th}$ )

โกศล โอบารโพรโรจน์ (2556 : 509) กล่าวว่า ในวงจรเชิงเส้นใด ๆ สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลตามทฤษฎีของเทเวนินจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานเทเวนิน ( $R_{Th}$ ) โดยค่าแรงดันเทเวนินหาได้จากแรงดันที่ขั้วเปิดวงจร เรียกว่า แรงดันเทเวนิน

( $E_{Th}$ ) และค่าความต้านทานหาได้จากการทำให้แหล่งจ่ายอิสระทุกตัวเป็นศูนย์ซึ่งจะได้ค่าความต้านทาน เรียกว่า ความต้านทานเทเวนิน ( $R_{Th}$ )

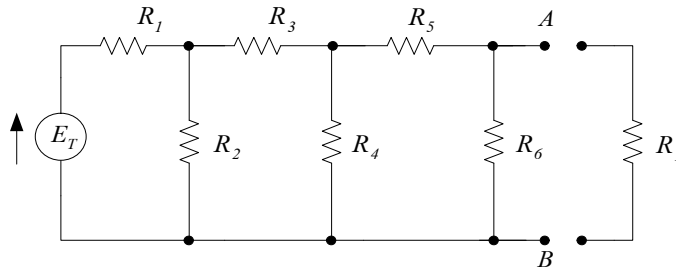
วิชญ บัวเทศ (2558 : 178) กล่าวว่า ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าถ้าหากใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ยังไม่สามารถแก้ปัญหาในการคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้า หากใช้ทฤษฎีของเทเวนินในวงจรเชิงเส้นที่มีแหล่งจ่ายต่ออยู่ด้วย สามารถยุบหรือรวมวงจรให้อยู่ในรูปแบบแหล่งจ่ายแรงดัน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ทฤษฎีของเทเวนินซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถแก้ปัญหาทางวงจรไฟฟ้าที่จะต้องสร้างสมการที่ยู่ยากที่ต้องใช้รูปแบบเมทริกซ์และดิเทอร์มิแนนท์ในการแก้สมการ ซึ่งทฤษฎีของเทเวนินเหมาะสำหรับการหาค่ากระแสไหลผ่านตัวต้านทานตัวใดตัวหนึ่งที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยไม่ต้องตั้งสมการขึ้นมาใหม่เหมือนกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงตามทฤษฎีของเทเวนินมีหลักการวิเคราะห์ห้วงจรลิเนียร์ที่มีแหล่งจ่ายต่ออยู่ด้วย โดยกำหนดขั้วเอาต์พุต  $A$  และ  $B$  เพื่อทำการยุบวงจรให้เหลือเพียงแหล่งจ่ายแรงดัน  $E_{Th}$  เพียงหนึ่งตัว และความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$  เป็นค่าความต้านทานของวงจรลิเนียร์ของขั้ว  $A$  และ  $B$  โดยค่าความต้านทาน  $R_{Th}$  ดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้โดยการแทนแหล่งจ่ายแรงดันด้วยวงจรลัดและแทนแหล่งจ่ายกระแสด้วยวงจรเปิดจากนั้นลดรูปตัวต้านทานโดยใช้หลักการลดรูปของการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมหรือแบบขนาน ดังภาพที่ 8.1



**ภาพที่ 8.1** วงจรลิเนียร์ที่มีแหล่งจ่าย (ก) วงจรเชิงเส้น และ (ข) วงจรสมมูลตามทฤษฎีของเทเวนิน  
ที่มา : เจษฎา ชินรุ่งเรือง (2553 : 64)

จากภาพที่ 8.1 วงจรลิเนียร์ที่มีแหล่งจ่ายต่ออยู่ด้วยโดยกำหนดขั้วเอาต์พุต  $A$  และ  $B$  เพื่อทำการยุบวงจรให้เหลือเพียงแหล่งจ่ายแรงดัน  $E_{Th}$  เพียงหนึ่งตัว สามารถเขียนวงจรเทียบเท่าเทเวนินดังภาพที่ 8.2



ภาพที่ 8.2 วงจรเทียบเท่าเทเวนิน

ที่มา : ชัด อินทะสี (2553 : 277)

จากภาพที่ 8.2 แสดงลักษณะของวงจรสมมูลเทเวนินที่จะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันเทเวนิน  $E_{Th}$  ต่อวงจรรวมกับตัวต้านทานและโหลด  $R_L$  ในวงจร และความต้านทานเทเวนิน คือค่าความต้านทานรวมระหว่างขั้ว  $A$  และ  $B$  เมื่อทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์

### การวิเคราะห์ห้วงจรตามทฤษฎีของเทเวนิน

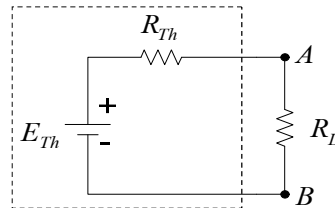
การวิเคราะห์ห้วงจรตามทฤษฎีของเทเวนินเป็นทฤษฎีที่มีความสำคัญที่ช่วยในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงและสามารถแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดตัวใดตัวหนึ่งที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงค่าได้ และได้มีผู้กล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจรตามทฤษฎีของเทเวนิน มีดังนี้

ประสิทธิ์ ภูสมมา (2553 : 148) กล่าวว่า การวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าตามทฤษฎีของเทเวนินนั้นจะมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจร มีอยู่ 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปลดองค์ประกอบที่เป็นโหลดของวงจรออก ขั้นตอนการกำหนดขั้วตรงจุดที่ปลดโหลดออก ขั้นตอนการหาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน ( $R_{Th}$ ) ขั้นตอนการหาค่าแรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) และขั้นตอนเขียนวงจรสมมูลเทเวนิน

กองพัน อาริรัช (2557 : 178) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงวงจรใด ๆ ที่จะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายในลักษณะต่าง ๆ ไปเป็นวงจรสมมูลเทเวนินโดยมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจร มีอยู่ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการหาค่าแรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) ขั้นตอนการหาค่าความต้านทานสมมูลเทเวนิน ( $R_{Th}$ ) และขั้นตอนการเขียนวงจรสมมูลเทเวนิน

วิชญ บัวเทศ (2558 : 179) กล่าวว่า ในกระบวนการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าตามทฤษฎีของเทเวนินนั้นจะมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจร มีอยู่ 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปลดโหลด ขั้นตอนการหาค่าแรงดันเทเวนิน ขั้นตอนการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันหรือเปิดวงจรแหล่งจ่ายกระแสในแต่ละกรณี ขั้นตอนการหาค่าความต้านทานเทเวนิน และขั้นตอนการเขียนวงจรสมมูลของเทเวนิน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การวิเคราะห์วงจรตามทฤษฎีของเทเวนินโดยมีลำดับขั้นตอนการหาค่าแรงดันเทเวนิน ( $E_{Th}$ ) และการหาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน ( $R_{Th}$ ) ซึ่งสามารถพิจารณาจากวงจรสมมูลเทเวนินเมื่อต่อโหลด ดังภาพที่ 8.3



ภาพที่ 8.3 วงจรสมมูลเทเวนินเมื่อต่อโหลด  $R_L$

ที่มา : Floyd (1998 : 206)

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 8.4 สามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของเทเวนิน (ประสิทธิ์ ภูสมมา. 2553 : 148-149) ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปลดองค์ประกอบที่ถูกมองว่าเป็นโหลดของวงจรออก

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดขั้วตรงจุดที่ปลดโหลดออก ในที่นี้จะกำหนดเป็นขั้ว  $A$  และ  $B$

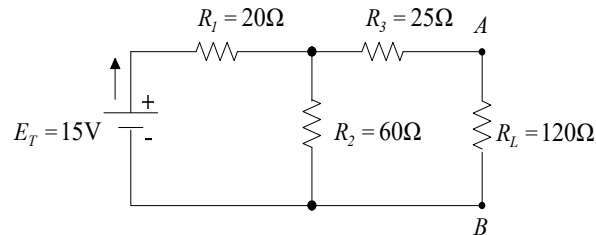
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า  $R_{Th}$  โดยการทำให้แหล่งจ่ายทั้งหมดเป็นศูนย์ (แหล่งจ่ายแรงดันให้ทำการลัดวงจร (Short Circuit) และแหล่งจ่ายกระแสให้ทำการเปิดวงจร (Open Circuit) แล้วทำการหาค่าความต้านทานระหว่างจุด  $A$  กับ  $B$  (ถ้าแหล่งจ่ายมีค่าความต้านทานภายในจะต้องนำมาคิดคำนวณด้วย)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า  $R_{Th}$  ที่ขั้ว  $A$  และ  $B$

ขั้นตอนที่ 5 เขียนวงจรสมมูลเทเวนิน และนำโหลดที่ปลดออกตามขั้นตอนที่ 1 มาต่อที่จุด  $A$  กับ  $B$  และคำนวณหากระแสหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าในวงจร

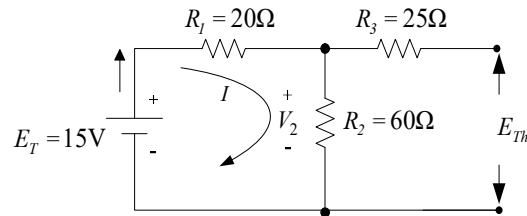
จากลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของเทเวนินโดยวิธีการปลดส่วนที่ถูกกำหนดให้เป็นโหลดออกเหลือไว้เพียงเฉพาะขั้วที่ถูกเปิดวงจร ซึ่งความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$  เป็นความต้านทานทั้งหมด เมื่อพิจารณาขั้วที่ถูกเปิดวงจร ขณะที่หาค่า  $R_{Th}$  นั้นต้องไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าใด ๆ ในวงจร โดยลัดวงจรที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า หรือเปิดวงจรที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเทียบเคียงเทเวนิน  $E_{Th}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วที่เปิดวงจรคำนวณได้ และในขั้นตอนสุดท้ายแทนวงจรเดิมด้วยวงจรเทียบเคียงเทเวนิน โดยขั้วของวงจรเทียบเคียงเทเวนินต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกับขั้ววงจรเดิม จากนั้นนำส่วนที่ถูกปลดออกไป กลับมาต่อไว้ที่ขั้วดังกล่าวอีกครั้งเพื่อแก้ปัญหาโจทย์ที่ต้องการทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ (วิษณุ บัวเทศ. 2558 : 181-183)

ตัวอย่างที่ 8.1 จงคำนวณหาค่าของกระแสที่ไหลผ่าน  $R_L$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.4



ภาพที่ 8.4 วงจรเทเวนินเมื่อต่อโหลด  $R_L = 120\Omega$

จากภาพที่ 8.4 สามารถเขียนวงจรแรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  โดยการคำนวณหาค่าระหว่างขั้ว  $A$  และ  $B$  ในขณะเปิดวงจร (open circuit) ส่วนความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  คือค่าความต้านทานรวมทั้งหมดของวงจรที่มองจากทางด้านขั้ว  $A$  และ  $B$  ดังภาพที่ 8.5



ภาพที่ 8.5 แรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$

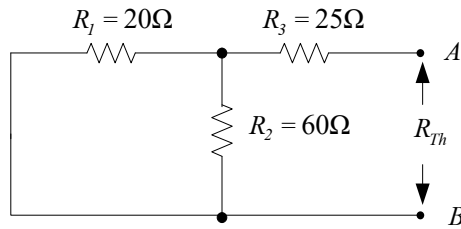
### วิธีทำ

- หาค่าแรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  โดยใช้กฎของโอห์ม  $I_T = \frac{E_T}{R_T}$  จะได้ว่า

$$I_T = \frac{E_T}{R_1 + R_2} = \frac{15V}{20\Omega + 60\Omega} = 0.18A$$

$$E_{Th} = I \times R_2 = 0.18A \times 60\Omega = 10.8V$$

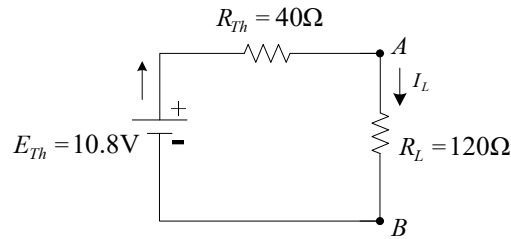
- หาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  ได้ ดังภาพที่ 8.6



ภาพที่ 8.6 ความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$

$$R_{Th} = R_3 + \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = 25\Omega + \frac{20\Omega \times 60\Omega}{20\Omega + 60\Omega} = 40\Omega$$

3. นำค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  ที่ได้จากการคำนวณมาเขียนวงจรเทียบเท่าเทเวนิน โดยการนำ  $R_L$  ที่ปลดออกในลำดับขั้นตอนแรกมาต่ออีกครั้งได้ ดังภาพที่ 8.7



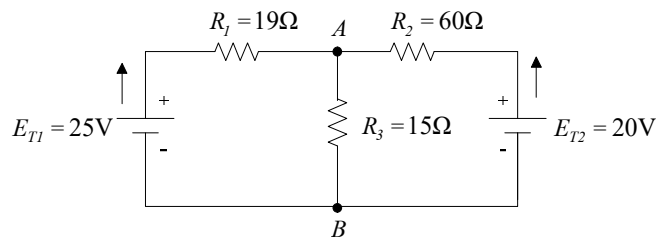
ภาพที่ 8.7 วงจรเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$

จากภาพที่ 8.7 จงหาค่าของกระแสที่ไหลผ่าน  $R_L$  จะได้ว่า

$$I_L = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} = \frac{10.8V}{40\Omega + 120\Omega} = 0.06A$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 0.06A

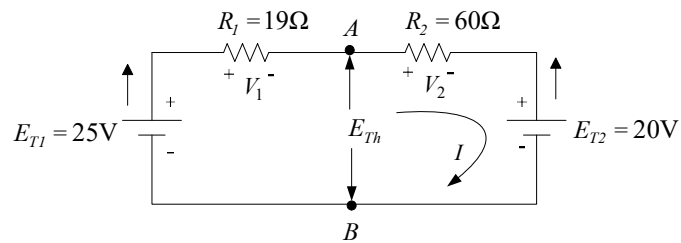
ตัวอย่างที่ 8.2 จงคำนวณหาค่ากระแสไหลผ่านความต้านทาน  $R_3$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.8



ภาพที่ 8.8 การกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$

วิธีทำ

1. หาค่าแรงดันเทียบเคียงเทเวนิน  $E_{Th}$  ได้ ดังภาพที่ 8.9



ภาพที่ 8.9 ลักษณะการปลด  $R_3$  ออกจากวงจร

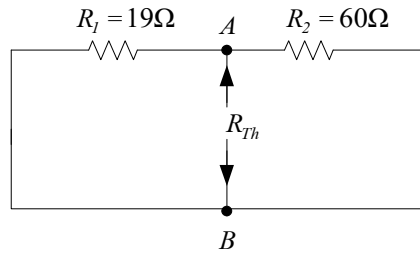
$$\begin{aligned} I &= \frac{E_{T1} - E_{T2}}{R_1 + R_2} \\ &= \frac{25V - 20V}{19\Omega + 60\Omega} \\ &= 0.06A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= I \times R_1 \\ &= 0.06A \times 19\Omega \\ &= 1.14V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_3 &= I \times R_2 \\ &= 0.06A \times 60\Omega \\ &= 3.6V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{Th} &= E_{T1} - V_1 \\ &= 25V - 1.14V \\ &= 23.86V \end{aligned}$$

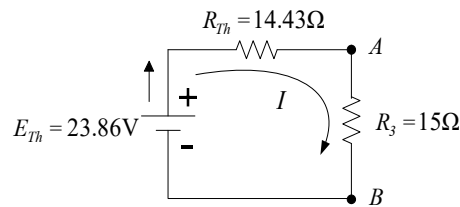
2. หาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  โดยการลัดวงจรแบตเตอรี่ 25V และ 20V เมื่อพิจารณาจากขั้ว  $A$  และ  $B$  ได้ ดังภาพที่ 8.10



ภาพที่ 8.10 ลักษณะการปลดแหล่งจ่าย  $E_1$  และ  $E_2$  ออกจากวงจร

$$\begin{aligned} R_{Th} &= \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \\ &= \frac{19\Omega \times 60\Omega}{19\Omega + 60\Omega} \\ &= 14.43\Omega \end{aligned}$$

3. นำค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  ที่ได้จากการคำนวณมาเขียนวงจรเทียบเท่าเทเวนิน โดยการนำ  $R_3$  มาต่อที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  อีกครั้ง ดังภาพที่ 8.11



ภาพที่ 8.11 การยู่วงจรเพื่อหากระแสไหลผ่านความต้านทาน  $R_3$

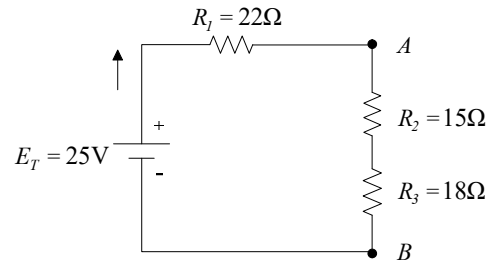
จากภาพที่ 8.11 จงหาค่าของกระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} I_{R_3} &= \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_3} \\ &= \frac{23.86\text{V}}{14.43\Omega + 15\Omega} \\ &= 0.81\text{A} \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_3$  มีค่าเท่ากับ 0.81A

ตัวอย่างที่ 8.3 จงคำนวณหาค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  วงจรเทียบเท่าเทเวนินระหว่างขั้ว  $A$  และ  $B$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.12

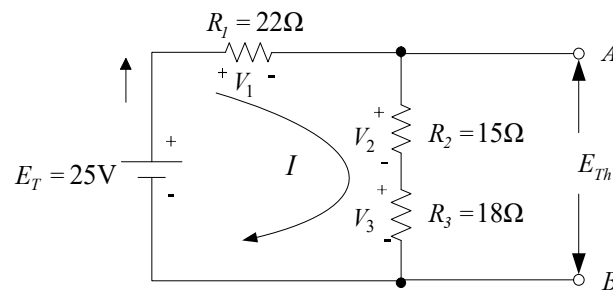




ภาพที่ 8.12 วงจรเทียบเท่าเทเวนินระหว่างขั้ว  $A$  และ  $B$

### วิธีทำ

1. หาค่าแรงดันเทียบเท่าเทเวนินที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.13



ภาพที่ 8.13 แรงดันเทียบเท่าเทเวนิน

$$I = \frac{E_T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{25\text{V}}{22\Omega + 15\Omega + 18\Omega} = 0.45\text{A}$$

$$V_1 = I \times R_1 = 0.45\text{A} \times 22\Omega = 9.9\text{V}$$

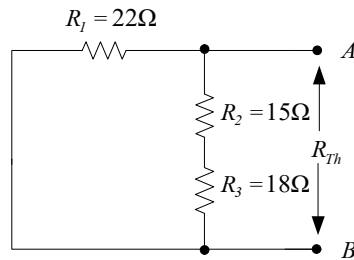
$$V_2 = I \times R_2 = 0.45\text{A} \times 15\Omega = 6.75\text{V}$$

$$V_3 = I \times R_3 = 0.45\text{A} \times 18\Omega = 8.1\text{V}$$

ดังนั้น จะได้แรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$

$$\begin{aligned}
 E_{Th} &= V_2 + V_3 \\
 &= 6.75\text{V} + 8.1\text{V} \\
 &= 14.85\text{V}
 \end{aligned}$$

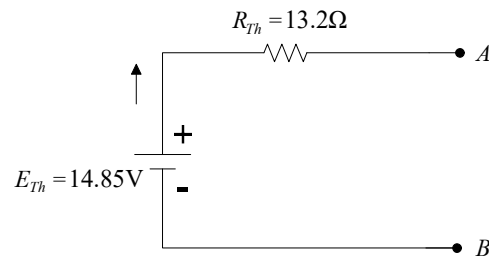
2. หาค่า  $R_{Th}$  โดยการลัดวงจรแหล่งกำเนิดแรงดัน 25V จากวงจรใน เมื่อพิจารณาจากทางด้านขั้ว  $A$  และ  $B$  ดังภาพที่ 8.14



ภาพที่ 8.14 ความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน

$$\begin{aligned}
 R_{Th} &= \frac{R_1 \times (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \\
 &= \frac{22\Omega \times (15\Omega + 18\Omega)}{22\Omega + 15\Omega + 18\Omega} \\
 &= 13.2\Omega
 \end{aligned}$$

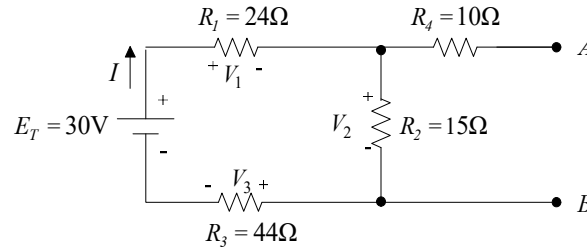
3. นำค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  ที่ได้จากการคำนวณมาเขียนวงจรเทียบเท่าเทเวนินระหว่างขั้ว  $A$  และ  $B$  ดังภาพที่ 8.15



ภาพที่ 8.15 วงจรเทียบเท่าเทเวนินของ  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าแรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  มีค่าเท่ากับ 14.85V และค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  มีค่าเท่ากับ 13.2Ω

ตัวอย่างที่ 8.4 จงคำนวณหาค่าแรงดันเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  และจงหาค่ากระแสไหลผ่าน โหลด  $10\Omega$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.16



ภาพที่ 8.16 วงจรเทียบเท่าเทเวนินการต่อขั้ว A และ B

### วิธีทำ

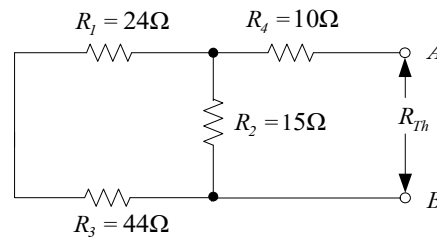
1. หาค่ากระแสไหลผ่านความต้านทานรวมในวงจร จะได้ว่า

$$I_T = \frac{E_T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{30V}{24\Omega + 15\Omega + 44\Omega} = 0.36A$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$E_{Th} = V_2 = I \times R_2 = 0.36A \times 15\Omega = 5.4V$$

2. หาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  ดังภาพที่ 8.17

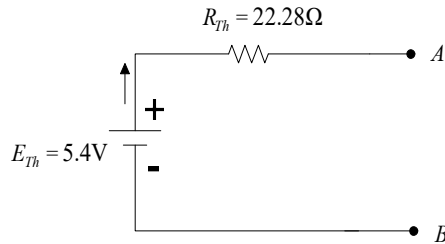


ภาพที่ 8.17 การลัดวงจรแหล่งกำเนิดแรงดัน

$$\begin{aligned} R_{Th} &= R_4 + \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} \\ &= 10\Omega + \frac{15\Omega \times (24\Omega + 44\Omega)}{15\Omega + 24\Omega + 44\Omega} \end{aligned}$$

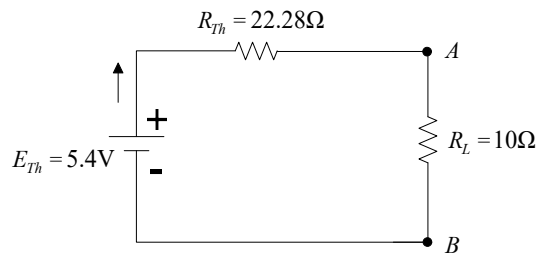
$$= 22.28\Omega$$

3. นำค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  ที่ได้จากคำนวณเขียนวงจรเทียบเท่าเทเวนิน ดังภาพที่ 8.18



ภาพที่ 8.18 วงจรเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$

4. นำค่าความต้านทาน  $10\Omega$  มาต่อรวมที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  ดังภาพที่ 8.19

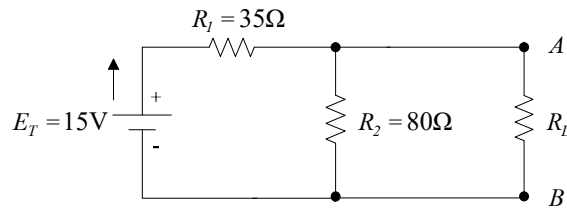


ภาพที่ 8.19 วงจรเทียบเท่าเทเวนิน  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R} \\ &= \frac{5.4V}{22.28\Omega + 10\Omega} \\ &= 0.16A \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $10\Omega$  มีค่าเท่ากับ  $0.16A$

**ตัวอย่างที่ 8.5** จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $R_L$  เมื่อโหลด  $R_L$  เป็น  $150\Omega$ ,  $200\Omega$  และ  $300\Omega$  ตามที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.20

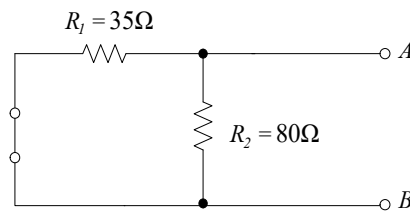


ภาพที่ 8.20 วงจรผสม

จากภาพที่ 20 สามารถวิเคราะห์ตามทฤษฎีบทของเทเวนิน ในลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอน (ประสิทธิ์ ภูสมมา. 2553 : 149-150) ดังต่อไปนี้

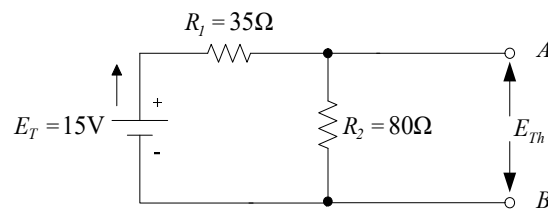
### วิธีทำ

1. ปลดโหลด  $R_L$  ออก พร้อมทั้งกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$  และคำนวณหาความต้านทานเทเวนินที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  และลัดวงจรที่แหล่งจ่ายแรงดัน ดังภาพที่ 8.21



ภาพที่ 8.21 การลัดวงจรที่แหล่งจ่ายแรงดันและปลดโหลด  $R_L$

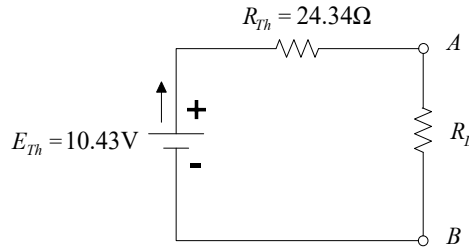
2. หาค่าแรงดันเทเวนินที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  โดยใช้กฎการแบ่งแรงดัน ดังภาพที่ 8.22



ภาพที่ 8.22 แรงดันสมมูลเทเวนิน

$$\begin{aligned}
 E_{Th} &= \frac{R_2 \times E_T}{R_1 + R_2} = \frac{80\Omega \times 15V}{35\Omega + 80\Omega} \\
 &= 10.43V
 \end{aligned}$$

3. สามารถเขียนวงจรสมมูลเทเวนิน และนำโหลดที่ปลดออกจากขั้นตอนที่ 1 มาต่อที่จุด  $A$  และ  $B$  แล้วทำการคำนวณหาค่ากระแส  $I_L$  ดังภาพที่ 8.23



ภาพที่ 8.23 วงจรสมมูลเทเวนินเมื่อต่อโหลด  $R_L$

$$I_L = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

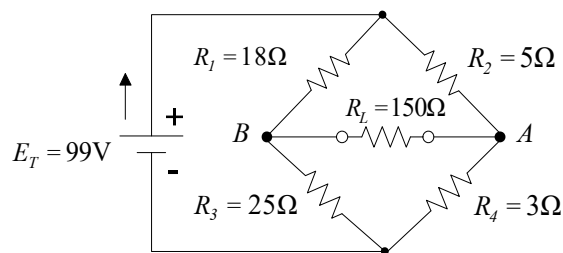
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R_L = 150\Omega &= \frac{10.43\text{V}}{24.34\Omega + 150\Omega} \\ &= 0.05\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R_L = 200\Omega &= \frac{10.43\text{V}}{24.34\Omega + 200\Omega} \\ &= 0.04\text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R_L = 300\Omega &= \frac{10.43\text{V}}{24.34\Omega + 300\Omega} \\ &= 0.03\text{A} \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทาน  $150\Omega$  มีค่าเท่ากับ  $0.05\text{A}$  ค่าความต้านทาน  $200\Omega$  มีค่าเท่ากับ  $0.04\text{A}$  และค่าความต้านทาน  $300\Omega$  มีค่าเท่ากับ  $0.03\text{A}$

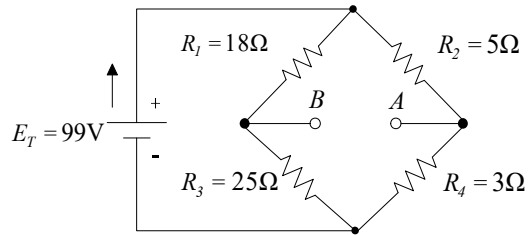
**ตัวอย่างที่ 8.6** จงวิเคราะห์วงจรบริดจ์สมมูลตามทฤษฎีของเทเวนิน และจงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $R_L$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.24



ภาพที่ 8.24 วงจรบริดจ์สมมูลตามทฤษฎีของเทเวนิน

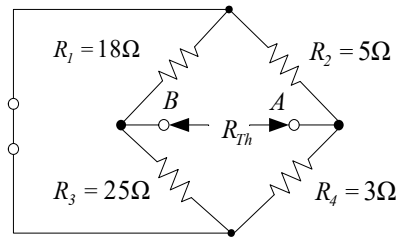
## วิธีทำ

1. ทำการปลด  $R_L$  ออกจากวงจร ดังภาพที่ 8.25



ภาพที่ 8.25 การกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$  วงจรบริดจ์สมมูล

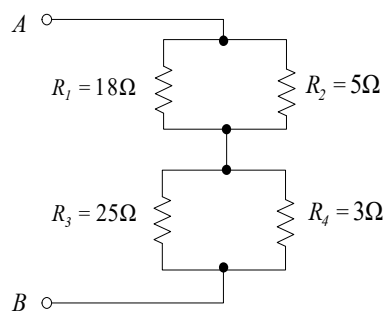
2. หาค่าความต้านทาน  $R_{Th}$  โดยการลัดวงจรที่แหล่งจ่ายแรงดัน ดังภาพที่ 8.26



ภาพที่ 8.26 การลัดวงจรที่แหล่งจ่ายแรงดันวงจบริดจ์

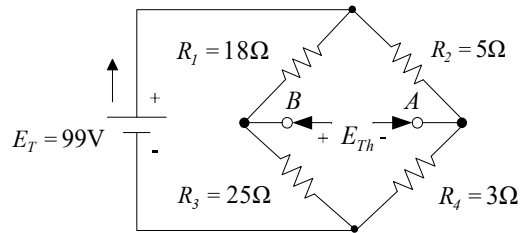
$$\begin{aligned}
 R_{Th} &= \frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \times R_4}{R_2 + R_4} = \frac{18\Omega \times 25\Omega}{18\Omega + 25\Omega} + \frac{5\Omega \times 3\Omega}{5\Omega + 3\Omega} \\
 &= 10.46\Omega + 1.87\Omega \\
 &= 12.33\Omega
 \end{aligned}$$

สามารถยุบวงจรได้ ดังภาพที่ 8.27



ภาพที่ 8.27 การกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$  สำหรับความต้านทาน  $R_{Th}$

3. ขั้นตอนที่ 4 หาค่า  $E_{Th}$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.28



ภาพที่ 8.28 การกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$  สำหรับแรงดัน  $E_{Th}$

จากภาพที่ 8.28 เมื่อใช้กฎการแบ่งแรงดัน จะได้ว่า

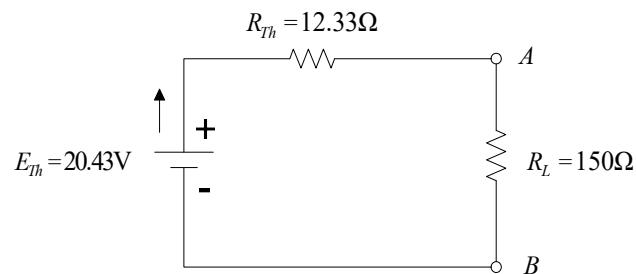
$$V_1 = \frac{R_1 \times E_T}{R_1 + R_3} = \frac{18\Omega \times 99V}{18\Omega + 25\Omega} = 41.44V$$

$$V_2 = \frac{R_2 \times E_T}{R_2 + R_4} = \frac{5\Omega \times 99V}{5\Omega + 3\Omega} = 61.87V$$

เมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในการหาค่า  $E_{Th}$  ของ Loop 1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะได้ว่า

$$E_{Th} = V_2 - V_1 = 61.87V - 41.44V = 20.43V$$

4. นำค่า  $E_{Th}$  และ  $R_{Th}$  ที่ได้จากการคำนวณมาเขียนวงจรสมมูลเทเวนิน ดังภาพที่ 8.29



ภาพที่ 8.29 วงจรสมมูลเทเวนินของวงจรบริดจ์ต่อกับโหลด

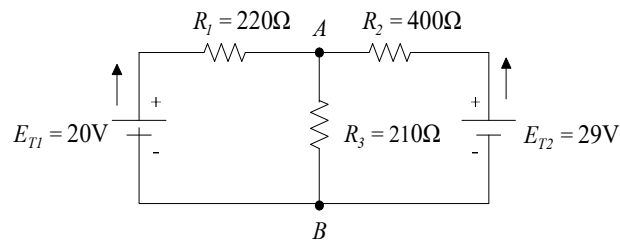
จากภาพที่ 8.29 หาค่ากระแส  $I_L$  จะได้ว่า

$$I_L = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} = \frac{20.43V}{12.33\Omega + 150\Omega} = 0.12A$$



ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$  มีค่าเท่ากับ  $12.33\Omega$  ค่าแรงดันเทเวนิน  $E_{Th}$  มีค่าเท่ากับ  $20.43V$  และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $0.12A$

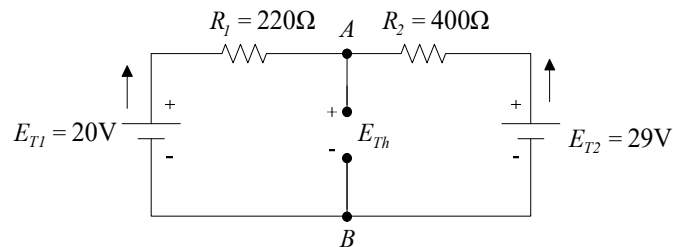
ตัวอย่างที่ 8.7 จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.30



ภาพที่ 8.30 วงจรและการกำหนดขั้ว  $A$  และ  $B$

### วิธีทำ

1. หาค่าแรงดันเทียบเคียงเทเวนิน  $E_{Th}$  โดยต้องปลด  $R_3$  ออกจากวงจร และหาแรงดันตกคร่อมจุด  $A$  และ  $B$  ดังภาพที่ 8.31



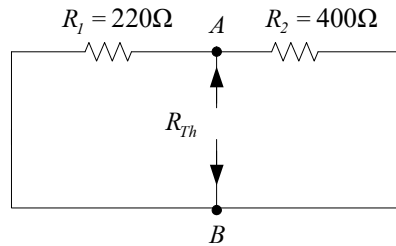
ภาพที่ 8.31 ลักษณะการปลด  $R_3$  ออกจากวงจร

จากภาพที่ 8.31 ใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I_T \times R_1 + E_{Th} - V_1 &= 0 \\
 I_T &= \frac{E_{T2} - E_{T1}}{R_1 + R_2} = \frac{29V - 20V}{220\Omega + 400\Omega} \\
 &= \frac{9}{620} \\
 &= 0.01A \\
 E_{Th} &= E_{T1} - I \times R_1 \\
 &= 20V - 0.01A \times 220\Omega
 \end{aligned}$$

$$= 17.8V$$

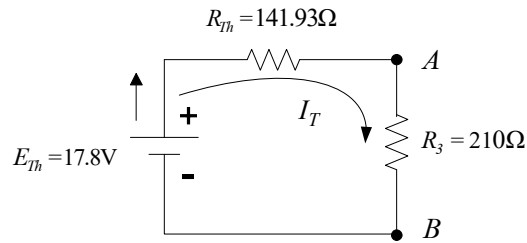
2. หาค่าความต้านทานเทียบเท่าเทเวนิน  $R_{Th}$  โดยการปลดแหล่งจ่าย  $E_{T1}$  และ  $E_{T2}$  ออกจากวงจร ดังภาพที่ 8.32



ภาพที่ 8.32 ลักษณะการปลดแหล่งจ่าย  $E_{T1}$  และ  $E_{T2}$  ออกจากวงจร

$$R_{Th} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{220\Omega \times 400\Omega}{220\Omega + 400\Omega} = 141.93\Omega$$

3. เขียนวงจรเทียบเท่าและนำค่า  $R_3$  มาต่อเพื่อคำนวณหาค่ากระแส  $I_3$  ดังภาพที่ 8.33



ภาพที่ 8.33 การยุบวงจรเพื่อหากระแสไหลผ่านความต้านทาน  $R_3$

$$I_3 = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_3} = \frac{17.8V}{141.93\Omega + 210\Omega} = 0.05A$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R_3$  มีค่าเท่ากับ 0.05A

จากการศึกษาตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรตามทฤษฎีของเทเวนิน สามารถนำหลักการทฤษฎีของเทเวนินมาใช้ในการแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าที่จะต้องสร้างสมการที่ยุ่งยากที่ต้องใช้รูปแบบเมทริกซ์และดีเทอร์มิแนนต์ในการแก้สมการของวงจรไฟฟ้าบางกรณีที่ไม่เหมาะในการนำรูปแบบการวิเคราะห์วงจรตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ตามเนื้อหาในบทที่ 7

## ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าใด ๆ ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่ออยู่จะเกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด และจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power) และในบางครั้งการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด จะต้องผ่านตัวต้านทานต่าง ๆ หลายตัว โดยสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่โหนดนั้นได้โดยการนำหลักการทฤษฎีเทเวนินมาใช้ในการวิเคราะห์วงจร และได้มีผู้กล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีดังนี้

ชัต อินทะสี (2553 : 348) กล่าวว่า การวิเคราะห์วงจรโดยการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่โหนด โดยการนำหลักการทฤษฎีเทเวนินมาใช้ในการวิเคราะห์วงจรซึ่งจะได้ว่าวงจรสมมูลของเทเวนินจะมีเพียงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทเวนิน และค่าความต้านทานเทเวนินที่ต่ออยู่ในวงจร จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหนดก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานของโหลด  $R_L$  เท่ากับค่าความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$

บรรณญาติ บริบูรณ์ (2556 : 1) กล่าวว่า การถ่ายโอนกำลังสูงสุดเป็นการออกแบบวงจรหรือควบคุมให้โหลดได้กำลังงานจากแหล่งจ่ายมากที่สุด เนื่องจากปริมาณกำลังของโหลดเป็นตัวบ่งชี้ว่า โหลดจะทำงานได้ในระดับใด เช่น หลอดไฟที่ได้รับกำลังงานมากหมายถึงการให้ความส่องสว่างมาก ซึ่งในการออกแบบวงจรไฟฟ้าให้โหลดอยู่ในภาวะที่ได้รับกำลังสูงสุด สามารถทำได้ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทเทเวนินมาใช้ในการคำนวณโดยพิจารณาได้จากวงจรสมมูลเทเวนินที่เชื่อมต่อโหลด  $R_L$

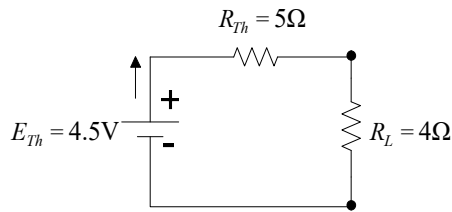
ชลิต พานทอง (2559 :1) กล่าวว่า การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดให้ได้กำลังงานที่โหลดมาก โดยโหลดจะต้องมีค่าความต้านทานที่สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด ในการวิเคราะห์วงจรจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทานต่าง ๆ อยู่หลายตัว ในการคำนวณโดยอาศัยหลักการของทฤษฎีเทเวนินโดยพิจารณาได้จากวงจรสมมูลเทเวนินที่เชื่อมต่อกับโหลด  $R_L$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทานต่าง ๆ ในการหาค่าการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด สามารถทำได้ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเทเวนินมาใช้ในการคำนวณโดยพิจารณาได้จากวงจรสมมูลเทเวนินที่เชื่อมต่อโหลด โดยวงจรสมมูลของเทเวนินจะมีเพียงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทเวนิน และค่าความต้านทานเทเวนินที่ต่ออยู่ในวงจรจะเกิดกำลังไฟฟ้าที่โหนดก็ต่อเมื่อต่อกับโหลด  $R_L$  สามารถพิจารณาได้จากสมการ (ชัต อินทะสี. 2553 : 348-349) และตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$I_L = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

$$\begin{aligned}
 P_L &= I^2 \times R_L = \left( \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 \times R_L \\
 &= \frac{E_{Th}^2}{(R_{Th} + R_L)^2} \times R_L
 \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 8.8** จงคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลด  $P_L$  เมื่อ  $R_{Th}$  มีค่ามากกว่า  $R_L$  ที่กำหนดให้ ดังภาพที่ 8.34



ภาพที่ 8.34 วงจรสมมูลของเทเวนิน  $R_{Th}$  มีค่ามากกว่า  $R_L$

**วิธีทำ**

$$\begin{aligned}
 I_L &= \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R_L} = \frac{4.5\text{V}}{5\Omega + 4\Omega} \\
 &= 0.5\text{A} \\
 P_L &= I_L^2 \times R_L = (0.5)^2 \text{A} \times 4\Omega \\
 &= 1\text{W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลด  $P_L$  มีค่าเท่ากับ 1W

**สรุป**

จากการศึกษาทฤษฎีของเทเวนินสามารถสรุปได้ว่าเป็นวิธีในการแก้ปัญหาในวงจรไฟฟ้าที่ซับซ้อนซึ่งได้กล่าวไว้ว่าวงจรไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear Circuit) ใด ๆ จะแทนได้ด้วยวงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียวต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน จำนวน 1 ตัว โดยทฤษฎีของเทเวนินสามารถนำมาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น โดยการหาวงจรเทียบเคียงของวงจรไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะประกอบไปด้วยแรงดันเทเวนินและความต้านทานเทเวนินโดยที่แรงดันเทเวนิน  $E_{Th}$  หาได้จากการพิจารณาว่าความต้านทาน  $\infty$  โอห์ม ต่ออยู่ที่ขั้วของวงจรเชิงเส้น (สภาวะเปิดวงจร) ดังนั้น แรงดันเทเวนินจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ขั้วของวงจรเชิงเส้น และความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$  หาได้จากการพิจารณาขั้วของวงจรเชิงเส้นทั้งสองเป็นหลักที่อยู่ในสภาวะที่สมมติให้แหล่งจ่ายแรงดันทั้งหมดในวงจรเชิงเส้นลัดวงจร และแหล่งจ่ายกระแสทั้งหมดในวงจรเชิงเส้นเปิดวงจร

การวิเคราะห์วงจรตามทฤษฎีของเทเวนิน สามารถสรุปตามขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรได้ว่า ในการคำนวณหาค่าแรงดันเทเวนิน  $E_{Th}$  และการคำนวณหาค่าความต้านทานเทเวนิน  $R_{Th}$  มี 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปลดองค์ประกอบที่ถูกมองว่าเป็นโหลดของวงจรออก

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดขั้วตรงจุดที่ปลดโหลดออก ในที่นี้จะกำหนดเป็นขั้ว  $A$  และ  $B$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า  $R_{Th}$  โดยการทำให้แหล่งจ่ายทั้งหมดเป็นศูนย์ (แหล่งจ่ายแรงดันให้ทำการลัดวงจร (Short Circuit) และแหล่งจ่ายกระแสให้ทำการเปิดวงจร (Open Circuit) แล้วทำการหาค่าความต้านทานระหว่างจุด  $A$  กับ  $B$  (ถ้าแหล่งจ่ายมีค่าความต้านทานภายในจะต้องนำมาคิดคำนวณด้วย)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่า  $R_{Th}$  ที่ขั้ว  $A$  และ  $B$

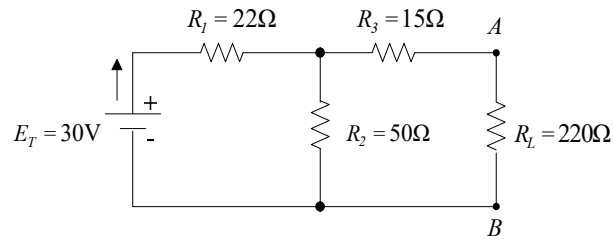
ขั้นตอนที่ 5 เขียนวงจรสมมูลเทเวนินและนำโหลดที่ปลดออกตามขั้นตอนที่ 1 มาต่อที่จุด  $A$  กับ  $B$  และคำนวณหากระแสหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าในวงจร

ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด สามารถสรุปได้ว่าการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทานต่าง ๆ ในการหาค่าการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดสามารถทำได้ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทเทเวนินมาใช้ในการคำนวณ โดยพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของเทเวนินจะมีเพียงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเทเวนิน และค่าความต้านทานเทเวนินที่ต่ออยู่ในวงจรจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดเมื่อทำการเชื่อมต่อกับโหลด  $R_L$

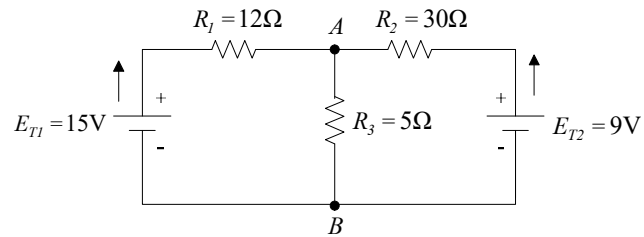
### คำถามท้ายบท

ให้นักศึกษาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงตามทฤษฎีของเทเวนิน และตอบคำถามให้ถูกต้องดังต่อไปนี้

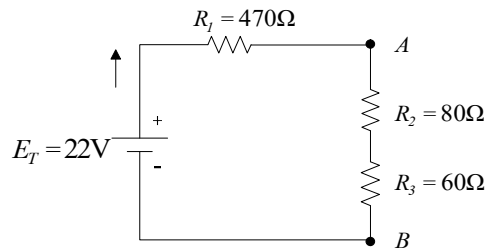
1. จงเขียนวงจรสมมูลเทเวนินแบบไม่มีโหลด  $R_L$  และแบบมีโหลด  $R_L$
2. จงบอกลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าตามทฤษฎีของเทเวนิน
3. จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด  $R_L$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



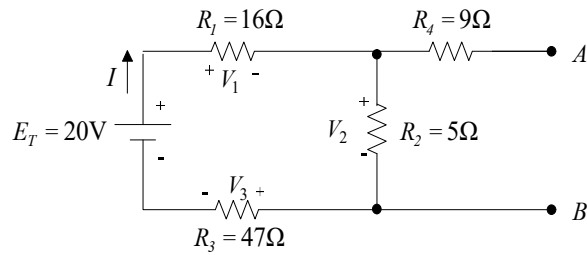
4. จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด  $R_L$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



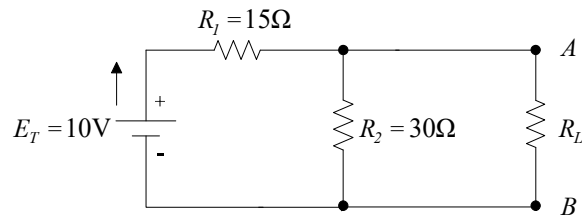
5. จงคำนวณหาค่า  $E_{Th}$  และค่า  $R_{Th}$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



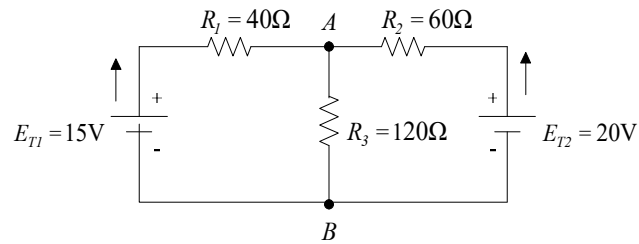
6. จงคำนวณหาค่า  $E_{Th}$  และค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน  $R_L = 10\Omega$  ต่อที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



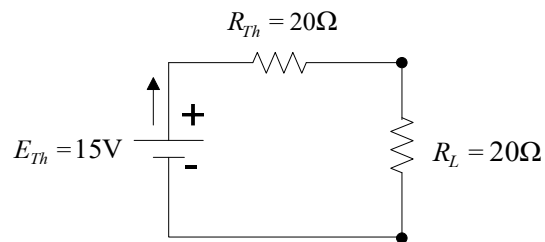
7. จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด  $R_L$  เมื่อโหลด  $R_L = 10\Omega$ ,  $20\Omega$  และ  $30\Omega$  ต่อที่ขั้ว  $A$  และ  $B$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



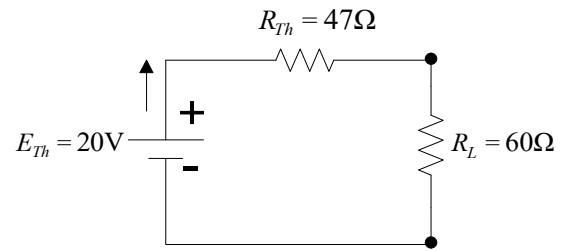
8. จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



9. จงคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลด  $P_L$  เมื่อ  $R_{Th}$  มีค่าเท่ากับ  $R_L$  จากภาพวงจรต่อไปนี้



10. จงคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลด  $P_L$  เมื่อ  $R_{Th}$  มีค่าน้อยกว่า  $R_L$  จากภาพวงจรต่อไปนี้





## เอกสารอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์. (2557). **วงจรไฟฟ้า**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยชนา ตั้งวงศ์ศานต์ และคณะ. (2556). **ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ภาควงจรกระแสตรง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ซัด อินทะสี. (2553). **วงจรไฟฟ้ากระแสตรง**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ชลิต พานทอง. (2559). **การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด**. (ออนไลน์) สืบค้นเมื่อวันที่ 6 มกราคม 2560. จาก <http://elearnkrutung.blogspot.com/2016/03/maximum-power-transfer-theorem.html>.
- เจษฎา ชินรุ่งเรือง. (2553). **ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บรรณญาติ บริบูรณ์. (2556). **การถ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด**. (ออนไลน์) สืบค้นเมื่อวันที่ 6 มกราคม 2560. จาก <http://academic.udru.ac.th/~banyat/circuit01/maximumpowertransfer.pdf>.
- ประสิทธิ์ ภูสมมา. (2553). **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- วิษณุ บัวเทศ. (2558). **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ปัญญาชน.
- Floyd, T.L. (1998). **Electric Circuit Fundamentals**. (4<sup>th</sup> ed). Upper Sandle River, NJ : Prentice-Hall.

