

บทที่ 2

องค์ประกอบวงจรไฟฟ้า

Electric Circuit Elements

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองวงจรแบบเชิงเส้น องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรไฟฟ้าชนิดต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน สวิตช์ ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ แหล่งจ่ายแบบอิสระและแบบขึ้นกับค่าตัวแปรอื่นๆ ซึ่งในบทถัดไปจะได้ศึกษาทฤษฎีที่จะใช้ในการวิเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้มาเชื่อมต่อกันเป็นวงจรไฟฟ้า

2.1 การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองเชิงเส้น

เป้าหมายสุดท้ายของงานด้านวิศวกรรมคือการออกแบบและผลิตอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งให้ใช้งานได้ตามต้องการ ในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอุปกรณ์เหล่านี้คืออุปกรณ์ไฟฟ้า วิศวกรจะใช้ขั้นตอนต่อไปนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์

1. การวิเคราะห์ปัญหา
2. การสังเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสม
3. การตรวจสอบหรือทดสอบผล

ในขั้นตอนสุดท้าย หากไม่ได้ผลตามที่ต้องการก็จะต้องกลับไปวนรอบในหัวข้อที่ 1 หรือ 2 ใหม่ จนกว่าจะได้ผลตามต้องการ

วิศวกรใช้แบบจำลอง (Model) ซึ่งหมายถึงตัวแทนขององค์ประกอบ อาจเป็นสมการคณิตศาสตร์หรือตัวแทนแบบอื่น เพื่อแทนองค์ประกอบต่างๆ ในวงจรไฟฟ้า จากนั้นจะต่อแบบจำลองขององค์ประกอบวงจรเหล่านี้เข้าด้วยกันเป็นแบบจำลองวงจร (Circuit Model)

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าอย่างง่ายคือไฟฉาย จะแสดงให้เห็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าทั่วไปซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่านี้มาก ทักษะในการสร้างแบบจำลองวงจรมีความสำคัญมากเท่ากับทักษะในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้น ซึ่งจะเป็นส่วนหลักที่จะศึกษาในวิชานี้ ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์วงจรถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ผู้ที่ศึกษาวิชาด้านวงจรไฟฟ้าควรเสาะหาเทคนิคและประสบการณ์ในการสร้างแบบจำลองวงจรเพิ่มเติมด้วยตนเอง เมื่อได้แบบจำลองวงจรที่เหมาะสมแล้วจะสามารถใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรที่จะได้ศึกษาต่อไปในวิชานี้ มาหาคำตอบที่ถูกต้องได้ต่อไป

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการแทนระบบไฟฟ้าอย่างง่ายในทางกายภาพมาเป็นแบบจำลองวงจรไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระตุ้นแบบต่างๆ ได้

ตัวอย่าง 2.1 จงสร้างแบบจำลองวงจรสำหรับไฟฉาย

วิธีทำ



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้าอย่างง่าย

รูปที่ 2.1 แสดงไฟฉายแทนระบบไฟฟ้าอย่างง่าย และส่วนประกอบทางกายภาพต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย แบตเตอรี่ หลอดไฟ สปริงตัวนำ กระบอกไฟฉาย ตัวสะท้อนแสง และสวิตช์ เราจะพิจารณาแบบจำลองสำหรับแต่ละองค์ประกอบดังนี้

แบตเตอรี่ หากใช้งานในสภาวะปกติ สามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันในอุดมคติ (Ideal Voltage Source) ใช้สัญลักษณ์ V_s

หลอดไฟ ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสง โดยการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดจนมีอุณหภูมิสูงพอที่จะเปล่งแสง เราสามารถใช้ตัวต้านทานในอุดมคติแทนไส้หลอด ใช้สัญลักษณ์ R_{lamp}

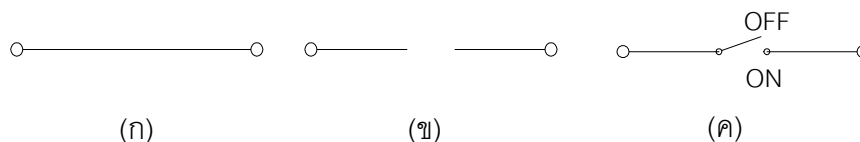
ตัวสะท้อนแสงจะช่วยรวมและสะท้อนแสงจากหลอดไฟให้มีความเข้มในทิศทางที่ต้องการมากขึ้น นั่นคือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่องสว่างนั่นเอง

สปริงตัวนำ ใช้ทำหน้าที่สองอย่าง คือเป็นตัวเชื่อมทางไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังกระบอกไฟฉาย และเป็นตัวให้แรงจากสปริงในการกดให้แบตเตอรี่ต่อกับหลอดไฟ การมีสปริงกดจะทำให้ความต้านทานที่รอยต่อระหว่างแบตเตอรี่กับหลอดไฟมีค่าน้อย เราจะใช้ตัวต้านทานในอุดมคติแทนความต้านทานที่รอยต่อระหว่างแบตเตอรี่กับหลอดไฟ ใช้สัญลักษณ์ R_{spring}

กระบอกไฟฉายก็ทำหน้าที่สองอย่างเช่นเดียวกัน คือเป็นตัวยึดองค์ประกอบอื่นๆ และในกรณีที่ เป็นกระบอกโลหะจะทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากหลอดไฟไปยังสปริงตัวนำ หากเป็นกระบอกพลาสติก จะต้องทำการต่อสายไฟหรือแถบตัวนำเพื่อทำหน้าที่ดังกล่าว เราจะใช้ตัวต้านทานในอุดมคติแทนความต้านทานระหว่างสปริงตัวนำกับหลอดไฟ ใช้สัญลักษณ์ R_{case}

องค์ประกอบสุดท้ายคือสวิตช์ ซึ่งทำหน้าที่ตัดและต่อวงจร โดยอาศัยสถานะตำแหน่งของสวิตช์คือ เปิดและปิด สวิตช์ในอุดมคติจะมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อต่อวงจร (On) และมีค่าความต้านทานเป็น

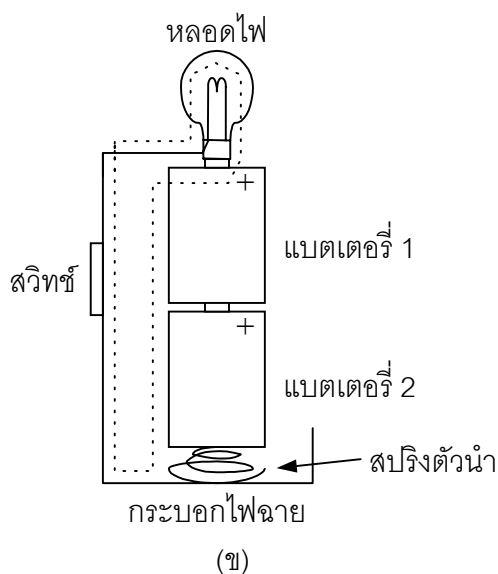
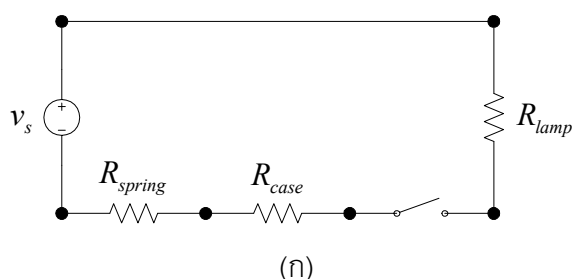
อนันต์เมื่อตัดวงจร (Off) ดังนั้นค่าความต้านทานของสวิตช์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการทำงาน ซึ่งค่าทั้งสองเป็นตัวแทนของค่าความต้านทานต่ำสุด (ศูนย์) และสูงสุด (อนันต์) ที่จะปรากฏในวงจรได้ ค่าทั้งสองนี้มีชื่อเรียกพิเศษคือ ความต้านทานปิดวงจร (ศูนย์) และความต้านทานเปิดวงจร (อนันต์) ตามลำดับ รูปที่ 2.2 แสดงสัญลักษณ์ของความต้านทานทั้งสองค่านี้และของสวิตช์



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์วงจรของ

(ก) ความต้านทานปิดวงจร (ข) ความต้านทานเปิดวงจร (ค) สวิตช์

จากองค์ประกอบทั้งหมดข้างต้น เราสามารถสร้างแบบจำลองวงจรสำหรับไฟฉาย ได้ดังในรูปที่ 2.3 (ก) สังเกตว่าวงจรที่ได้มีลักษณะเป็นวงรอบปิดเช่นเดียวกับลักษณะทางกายภาพของไฟฉาย (ตามเส้นประในรูปที่ 2.3 (ข)) และจะเห็นว่าเราอาจนำเฉพาะองค์ประกอบที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับวงจรในการทำให้เกิดแสงสว่างมาพิจารณาเท่านั้น ในตัวอย่างนี้จะไม่รวมองค์ประกอบที่ช่วยให้การส่องสว่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในที่นี้คือตัวสะท้อนแสง เนื่องจากยังไม่ต้องการพิจารณาระบบในแง่ประสิทธิภาพในการส่องสว่างนั่นเอง



รูปที่ 2.3 (ก) แบบจำลองวงจรสำหรับไฟฉาย (ข) ลักษณะทางกายภาพของไฟฉาย

จากตัวอย่างนี้เราสามารถตั้งข้อสังเกตได้ดังนี้

1. เราใช้ตัวต้านทานในอุดมคติแทน หลอดไฟ สปริงตัวนำ และกระบอกไฟฉาย สาเหตุที่เลือกตัวต้านทานมาแทนองค์ประกอบเหล่านี้คือทั้งสามองค์ประกอบทำด้วยโลหะและเป็นตัวแทนของเส้นทางการไหลผ่านของประจุไฟฟ้า โดยทั่วไปถ้าประจุไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ง่ายเราเรียกว่ามีความต้านทานน้อย ถ้าไหลผ่านได้ยากเราเรียกว่ามีความต้านทานมาก
2. เมื่อมีกระแสไหลผ่านความต้านทานของหลอดไฟจะก่อให้เกิดความร้อน และได้หลอดซึ่งทำด้วยโลหะที่มีคุณสมบัติที่จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแสงสว่าง ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการ ส่วนความต้านทานของสปริงตัวนำ และกระบอกไฟฉายเมื่อมีกระแสไหลผ่านจะเกิดความร้อนขึ้นและเป็นความสูญเสียที่เราไม่ต้องการและต้องทำให้เกิดน้อยที่สุด
3. ในการสร้างแบบจำลองวงจรนี้แม้ว่าจะเป็นตัวแทนของระบบที่ง่ายมาก ยังต้องการการใช้ค่าโดยประมาณ เช่นเราใช้ค่าความต้านทานศูนย์และอนันต์แทนสถานะของสวิตช์ ในทางปฏิบัติไม่มีสวิตช์ใดในโลกที่มีค่าความต้านทานศูนย์และอนันต์จริงๆ แต่อาจมีค่าใกล้เคียงเท่านั้น นอกจากนี้โดยใช้สมมติฐานว่าค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างสปริงโลหะและแบตเตอรี่มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้เรายังไม่ได้นำค่าความต้านทานนี้ซึ่งอาจน้อยมากแต่ไม่ใช่ศูนย์มาคิดอีกด้วย และในกรณีของแบตเตอรี่ ยังไม่ได้คิดส่วนของความต้านทานภายในตัวแบตเตอรี่เอง

จะเห็นได้ว่าการได้มาซึ่งแบบจำลองวงจรที่เป็นตัวแทนที่ดีของระบบที่กำลังพิจารณาต้องผ่านกระบวนการแทนสิ่งที่เกิดขึ้นทางกายภาพด้วยองค์ประกอบวงจรต่างๆ เช่นตัวต้านทาน แหล่งจ่ายแรงดัน และอื่นๆ ดังจะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป และต้องใช้การประมาณค่าที่เหมาะสมขององค์ประกอบเหล่านี้ สิ่งเหล่านี้จะส่งผลในตอนที่เราทดสอบแบบจำลองวงจรว่าจะสามารถทำนายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องหรือไม่ ในกรณีของตัวอย่างนี้คือให้ทำการต่อวงจรของระบบไฟฉายแล้ววัดค่าแรงดันของแบตเตอรี่และกระแสที่ไหลในวงจร หากสามารถคำนวณค่ากระแสในวงจรได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงแสดงว่าแบบจำลองวงจรและค่าต่างๆ ที่เรากำหนดให้องค์ประกอบทั้งหมดสอดคล้องกับค่าจริงในทางกายภาพ

เป้าหมายของการวิเคราะห์วงจรคือการทำนายพฤติกรรมเชิงปริมาณของวงจรหรือระบบกายภาพจากแบบจำลองวงจร โดยการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันที่หัวขององค์ประกอบทั้งหมดในวงจร ซึ่งจะนำไปสู่การอธิบายการทำงานและพฤติกรรมเชิงปริมาณของระบบได้

อุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรจะมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น (Linear) ถ้าการตอบสนองต่อการกระตุ้นใดๆ เป็นไปตามเงื่อนไขสองข้อ คือหลักการซูเปอร์โพสิชัน (Principle of Superposition) และคุณสมบัติความเป็นเอกพันธ์ (Property of Homogeneity)

พิจารณาองค์ประกอบวงจรในรูปที่ 2.1 ถ้ากำหนดให้ตัวกระตุ้นคือกระแส i และผลตอบสนองคือแรงดัน v เมื่อป้อนการกระตุ้นด้วยกระแส i_1 จะได้ผลตอบสนองคือแรงดัน v_1 และถ้าป้อนกระแส i_2 จะได้

ผลตอบสนองคือแรงดัน v_2 ในวงจรเชิงเส้นหรือสำหรับองค์ประกอบเชิงเส้น จะมีคุณสมบัติตามหลักการซูเปอร์โพสิชันคือเมื่อป้อนการกระตุ้นด้วยกระแส $i_1 + i_2$ จะได้ผลตอบสนองคือแรงดัน $v_1 + v_2$ นอกจากนี้ องค์ประกอบเชิงเส้นยังต้องมีคุณสมบัติความเป็นเอกพันธ์คือเมื่อการกระตุ้นถูกย่อ/ขยาย ผลตอบสนองจะต้องถูกย่อ/ขยายด้วยอัตราเดียวกัน นั่นคือ เมื่อป้อนการกระตุ้นด้วยกระแส ki จะได้ผลตอบสนองคือแรงดัน kv อุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรหรือวงจรใดมีคุณสมบัติไม่ครบหรือไม่มีคุณสมบัติตามเงื่อนไขสองข้อนี้จะถือว่าเป็นอุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรหรือวงจรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear)

ตัวอย่าง 2.2 พิจารณาองค์ประกอบวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังนี้

$$v = Ri$$

จงหาว่าองค์ประกอบวงจรนี้เป็นอุปกรณ์เชิงเส้นหรือไม่

วิธีทำ เนื่องจาก

$$v_1 = Ri_1 \text{ และ } v_2 = Ri_2$$

จึงทำให้ได้

$$\begin{aligned} v_1 + v_2 &= Ri_1 + Ri_2 \\ &= R(i_1 + i_2) \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นไปตามหลักการซูเปอร์โพสิชัน และจาก $v_1 = Ri_1$ ถ้า $i_2 = ki_1$ จะได้

$$v_2 = Ri_2 = Rki_1 = kv_1$$

ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติความเป็นเอกพันธ์ และเนื่องจากอุปกรณ์นี้มีคุณสมบัติการเป็นเชิงเส้นครบทั้งสองข้อ อุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรนี้จึงเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น

ตัวอย่าง 2.3 พิจารณาองค์ประกอบวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังนี้

$$v = i^2$$

จงหาว่าองค์ประกอบวงจรนี้เป็นอุปกรณ์เชิงเส้นหรือไม่

วิธีทำ เนื่องจาก

$$v_1 = i_1^2 \text{ และ } v_2 = i_2^2$$

จึงทำให้ได้

$$v_1 + v_2 = i_1^2 + i_2^2$$

แต่

$$(i_1 + i_2)^2 = i_1^2 + 2i_1i_2 + i_2^2 \text{ ซึ่ง } \neq i_1^2 + i_2^2$$

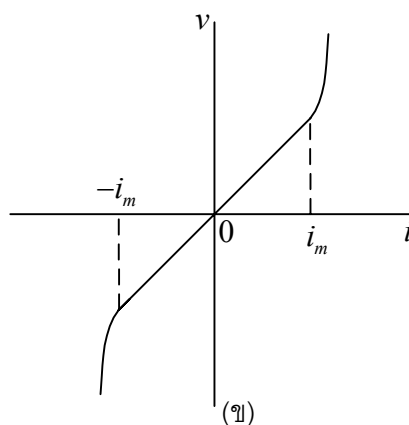
ดังนั้นจึงไม่เป็นไปตามหลักการซูเปอร์โพสิชัน อุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรนี้จึงเป็นอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

ข้อสังเกต จากตัวอย่างทั้งสองจะเห็นว่าการพิสูจน์ให้เป็นอุปกรณ์เชิงเส้นนั้นจะต้องพิสูจน์ว่ามีคุณสมบัติครบทั้งสองข้อ แต่ในกรณีการพิสูจน์ว่าไม่เป็นอุปกรณ์เชิงเส้นนั้นสามารถพิสูจน์ว่าไม่มีคุณสมบัติข้อใดข้อหนึ่งก็เพียงพอแล้ว

ตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นคือ หลอดไฟฟ้าแบบหลอดไส้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) จะเห็นได้จากกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันในรูปที่ 2.4 (ข) ว่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของอุปกรณ์นี้มีความเป็นเชิงเส้น (ตรงกับบริเวณเส้นตรงในกราฟ) เฉพาะเมื่อกระแสมีค่าในช่วง $-i_m \leq i \leq i_m$ เมื่อ i_m คือค่ากระแสสูงสุดที่หลอดไส้มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) หลอดไฟฟ้าแบบหลอดไส้ (ข) ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

การศึกษาในบทต่อไปของหนังสือเล่มนี้ จะครอบคลุมเนื้อหาเฉพาะองค์ประกอบวงจรที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น นั่นหมายความว่าวงจรที่เราจะศึกษาและวิเคราะห์ทั้งหมดอยู่ในกลุ่มของวงจรเชิงเส้น สำหรับการวิเคราะห์วงจรไม่เป็นเชิงเส้นสามารถศึกษาต่อได้เองในภายหลัง หรือเลือกลงวิชาขั้นสูงที่ต่อเนื่องจากวิชานี้

2.2 ชนิดขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า

การแบ่งชนิดขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าสามารถแบ่งได้หลายวิธีเช่นการแบ่งตามการใช้พลังงาน การแบ่งตามชนิดการใช้งาน และการแบ่งเป็นแบบเชิงเส้นไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชนิดขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า โดยแบ่งตามการใช้พลังงานขององค์ประกอบวงจรมานั้น คือดูว่าอุปกรณ์นี้ใช้หรือให้พลังงาน

ในกลุ่มแรกคืออุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากส่วนอื่นของวงจร เรียกว่าเป็นอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive Device) กล่าวได้ว่าค่าพลังงานที่อุปกรณ์นี้ใช้ (ได้รับจากอุปกรณ์อื่นๆ) มีค่าเป็นศูนย์หรือบวกเสมอ หากมีกระแสไหลเข้าสู่ตัวอุปกรณ์นี้ดังในรูปที่ 2.5 (ก) จะได้สมการคือ

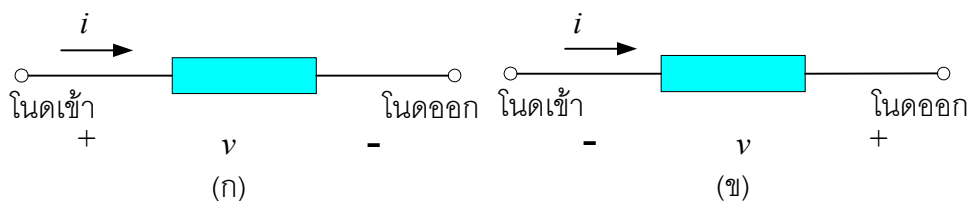
$$w = \int_{-\infty}^t vi \, dt \geq 0 \quad (2.1)$$

สำหรับทุกค่าเวลา t

ในกลุ่มที่สองคืออุปกรณ์ที่สามารถจ่ายพลังงานให้แก่ส่วนอื่นของวงจร เรียกว่าเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active Device) กล่าวได้ว่าค่าพลังงานที่อุปกรณ์นี้ให้ (แก่อุปกรณ์อื่นๆ) มีค่าเป็นศูนย์หรือบวกเสมอ หากมีกระแสไหลเข้าสู่ตัวอุปกรณ์นี้ดังในรูปที่ 2.5 (ข) จะได้สมการคือ

$$w = \int_{-\infty}^t vi \, dt \geq 0 \quad (2.2)$$

สำหรับค่าเวลา t เวลาใดเวลาหนึ่งก็เพียงพอ (ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานออกมาตลอดเวลา)



รูปที่ 2.5 (ก) โนดเข้าของกระแสคือขั้วบวกของแรงดัน (ข) โนดเข้าของกระแสคือขั้วลบของแรงดัน

ตัวอย่าง 2.4 พิจารณาองค์ประกอบวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังในรูปที่ 2.5 (ข)

เมื่อกระแสมีค่าคงที่ 5 A และแรงดันมีค่าคงที่ 6 V จงหาค่าพลังงานที่จ่ายออกมาในช่วงเวลา 0 ถึง T

วิธีทำ เนื่องจากกระแสไหลเข้าสู่องค์ประกอบนี้ทางขั้วลบ ดังนั้นองค์ประกอบนี้คืออุปกรณ์แอคทีฟ จ่ายพลังงานเท่ากับ

$$w = \int_{-\infty}^T 6 \times 5 \, d\tau = 30T \text{ J}$$

2.3 ตัวต้านทาน

เราเรียกการที่วัสดุสามารถต้านการไหลของประจุไฟฟ้าในตัวมันว่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของวัสดุนั้น ใช้สัญลักษณ์ ρ และได้มีการศึกษาและจัดแบ่งวัสดุประเภทที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำว่าเป็นวัสดุประเภทตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ตัวอย่างของตัวนำไฟฟ้าที่ดีคือ โลหะต่างๆ เช่น ทองแดง เงิน เป็นต้น ส่วนวัสดุประเภทที่มีความต้านทานจำเพาะสูงจะถูกจัดว่าเป็นวัสดุประเภทฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ตัวอย่างของฉนวนไฟฟ้าที่ดีคือ พลาสติกต่างๆ ไม้ และยาง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า เรียกว่าสารกึ่งตัวนำ

(Semiconductor) ซึ่งมีบทบาทมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมอื่นๆ ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มากคือ ซิลิกอน ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่นิยมใช้งานในทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ตาราง 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่นิยมใช้งานในทางวิศวกรรมไฟฟ้า

วัสดุ	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)
พลาสติกโพลีไธรีน	1×10^8
ซิลิกอน	2.3×10^5
คาร์บอน	4×10^{-3}
อลูมิเนียม	2.7×10^{-6}
ทองแดง	1.7×10^{-6}

ความต้านทาน (Resistance) คือคุณสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์หรือองค์ประกอบวงจรในการที่จะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์ R ซึ่งจอร์จ ไซมอน โอห์ม เป็นผู้ทำการลองและแสดงให้เห็นว่าในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่และลวดตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอสามารถอธิบายด้วยสมการ

$$i = \frac{Av}{\rho L} \quad (2.3)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำลวดตัวนำ L คือความยาวของลวดตัวนำ และ v คือแรงดันตกคร่อมลวดตัวนำ โอห์มได้ให้นิยามของค่าความต้านทาน R ดังนี้

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.4)$$

กฎของโอห์มซึ่งถูกตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 1827 (พ.ศ. 2370) หรือเกือบสองร้อยปีมาแล้ว กล่าวว่า

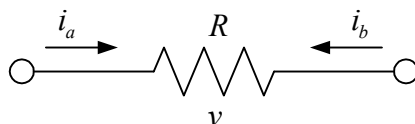
$$v = Ri \quad (2.5)$$

หน่วยของความต้านทานจึงถูกตั้งเป็นโอห์ม เพื่อเป็นเกียรติแก่จอร์จ ไซมอน โอห์ม นิยมใช้สัญลักษณ์ Ω



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน

องค์ประกอบใดๆ ในวงจรที่มีค่าความต้านทานจะเรียกว่า ตัวต้านทาน (Resistor) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์สองขั้วดังในรูปที่ 2.6 ตามกฎของโอห์มความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในบางกรณีตัวต้านทานอาจมีความเป็นเชิงเส้นสำหรับบางช่วงของค่ากระแส (หรือแรงดัน) ในวงจรที่เราจะศึกษาต่อไปนี้จะใช้สมมติฐานว่าตัวต้านทานในวงจรทั้งหมดมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของมันเป็นไปตามกฎของโอห์ม



รูปที่ 2.7 ตัวต้านทานและทิศทางอ้างอิงกระแสและแรงดัน

รูปที่ 2.7 แสดงตัวต้านทานและค่ากระแสและแรงดันรวมทั้งทิศทางอ้างอิงตามหลักการสัญญาณเครื่องหมายพาสซีฟ ในกรณีนี้คือทิศทางตามกระแส i_a จากกฎของโอห์มจะได้ว่า

$$v = Ri_a \quad (2.6)$$

หากแทน i_a ด้วย $-i_b$ จะได้ว่า

$$v = -Ri_b \quad (2.7)$$

ค่าแรงดันที่ได้มีเครื่องหมายลบเนื่องจากการใช้กระแส i_b ซึ่งมีทิศทางไม่เป็นไปตามหลักการสัญญาณเครื่องหมายพาสซีฟในการคำนวณ ดังนั้นจึงควรระมัดระวังในการใช้ทิศทางของกระแส

กฎของโอห์มตามสมการ (2.5) สามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$i = Gv \quad (2.8)$$

โดยที่ G คือค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) ในหน่วย SI คือ ซีเมนส์ (หน่วยอื่นใช้โมห์) ใช้สัญลักษณ์ S (หน่วยอื่นใช้ Ω)

ตัวต้านทานส่วนใหญ่ที่มีใช้กันทั่วไปอาจแบ่งได้เป็นสี่ประเภทตามวัสดุที่ใช้และกรรมวิธีการผลิต คือ ตัวต้านทานแบบคาร์บอน แบบคาร์บอนฟิล์ม แบบฟิล์มโลหะ และแบบลวดพันหรือไวร์วาร์ด รูปที่ 2.8 แสดงตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ดและแบบคาร์บอน

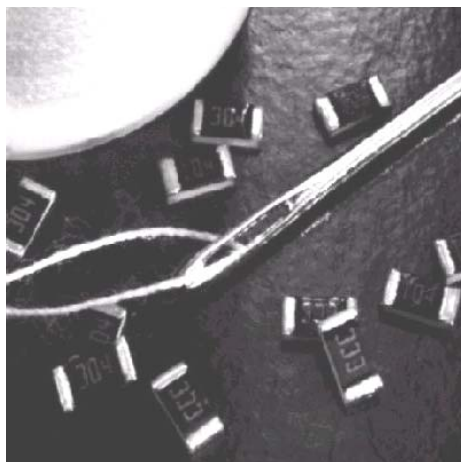


(ก)



(ข)

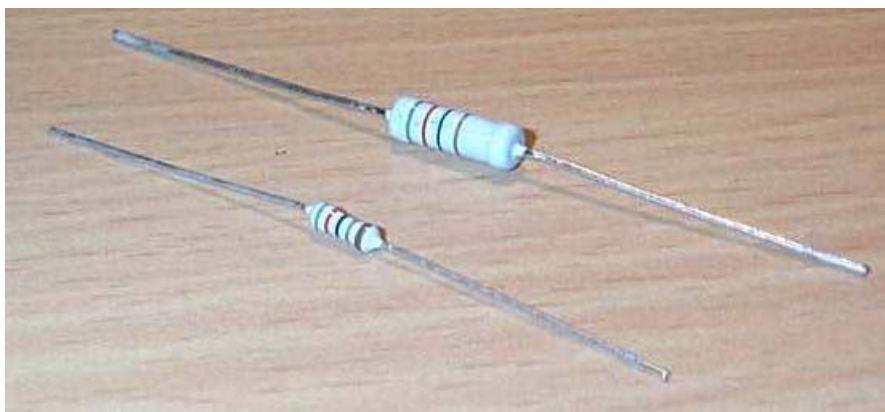
รูปที่ 2.8 ตัวต้านทาน (ก) แบบไวร์วาร์ด (ข) แบบคาร์บอน



รูปที่ 2.9 ตัวต้านทานแบบฟิล์มหนา

รูปที่ 2.9 แสดงตัวต้านทานแบบฟิล์มหนา (Thick Film Resistor) หรือบางครั้งเรียกว่าตัวต้านทานแบบชิป (Chip Resistor) นิยมใช้ในงานที่ต้องการขนาดเล็ก และใช้เทคนิคการติดตั้งแบบแปะผิว (Surface Mount) สังเกตขนาดเทียบกับหัวเข็มและด้าย

ตัวต้านทานสำหรับใช้งานทั่วไปจะมีค่าความคลาดเคลื่อน ตั้งแต่ $\pm 1\%$ $\pm 5\%$ $\pm 10\%$ จนถึง $\pm 20\%$ บางชนิดเช่นแบบคาร์บอน จะมีแถบสีบอกค่าความต้านทานและค่าความคลาดเคลื่อน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะที่สามารถทนกำลังได้ $0.25 \left(\frac{1}{4}\right) \text{ W}$ และ 1 W ตัวต้านทานสามารถทนกำลังได้มากกว่านี้คือ $0.5 \left(\frac{1}{2}\right) \text{ W}$ 1 W 2 W 5 W 10 W จนถึง 20 W หรืออาจมากกว่านี้ในกรณีของตัวต้านทานที่ใช้ในงานไฟฟ้ากำลัง ส่วนค่าน้อยกว่านี้คือ $0.125 \left(\frac{1}{8}\right) \text{ W}$



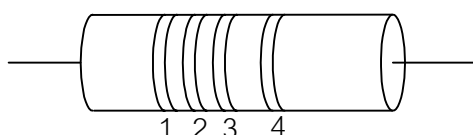
รูปที่ 2.10 ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 0.25 W (ซ้าย) เทียบกับขนาด 1 W (ขวา)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความต้านทานมาตรฐานที่มีขายทั่วไปสำหรับตัวต้านทานแบบคาร์บอน ความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ ค่าเหล่านี้เป็นเพียงตัวอย่างทั่วไปส่วนหนึ่งเท่านั้น ผู้ผลิตบางรายอาจผลิตค่าอื่นๆ นอกเหนือจากในตารางนี้ ส่วนตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ ความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$ จะมีค่าความต้านทานให้เลือกมากกว่า และอาจมีค่าความต้านทานที่มีค่าละเอียดถึงทศนิยมหนึ่งตำแหน่งด้วย

ตาราง 2.3 ค่าความต้านทานมาตรฐานสำหรับตัวต้านทานแบบคาร์บอน ความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$
(ให้ใช้ค่าในตารางคูณด้วยตัวคูณในช่วง 10^{-2} ถึง 10^8 เช่น $4.7 \times 10^3 = 4700 \ \Omega$ หรือ $4.7 \text{ k}\Omega$ เป็นต้น)

ค่าความต้านทาน						
1	2	3.3	4.7	5	6.8	8.2
1.2	2.2	3.9		5.6		
1.5	2.7					
1.8						

ตัวต้านทานขนาดใหญ่จะมีค่าความต้านทานและความคลาดเคลื่อนพิมพ์อยู่และสามารถอ่านค่าได้โดยไม่ต้องวัด แต่สำหรับตัวต้านทานขนาดเล็กเช่น ตัวต้านทานแบบคาร์บอน หรือแบบฟิล์มโลหะ จะไม่สามารถพิมพ์ค่าความต้านทานไว้ได้ แต่จะใช้สัญลักษณ์สี (Color Code) ในการอ่านค่าความต้านทานและความคลาดเคลื่อนแทน สำหรับตัวต้านทานแบบคาร์บอน โดยทั่วไปจะมีแถบสีสี่แถบดังแสดงในรูปที่ 2.11 ค่าจากสองแถบแรกคือค่าความต้านทานสองหลักแรก แถบที่สามจะเป็นตัวคูณ และแถบที่สี่จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อน ตารางที่ 2.4 แสดงค่าของแถบสีต่างๆ ตัวคูณ ค่าความคลาดเคลื่อน และค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ ในบางกรณีตัวต้านทานอาจมีมากกว่าหรือน้อยกว่าสี่แถบสี ในกรณีมีสามแถบสี (ไม่มีแถบ 4) จะอ่านค่าจากสามแถบเหมือนเดิมและจะใช้ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ส่วนในกรณีมีมากกว่าสี่แถบสี ต้องพิจารณาว่าแถบสีที่เพิ่มมาเป็นค่าความต้านทานหลักที่สามหรือค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิแล้วแต่กรณี ตัวอย่างการอ่านค่าความต้านทานและความคลาดเคลื่อนจากแถบสี เช่น แดง แดง ส้ม ทอง อ่านได้เป็น $22 \times 10^3 \pm 5\% \ \Omega$ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 แถบสีบนตัวต้านทานแบบคาร์บอน

ตาราง 2.4 การอ่านค่าความต้านทานมาตรฐานสำหรับตัวต้านทานแบบคาร์บอนจากแถบสี

สี	ค่า	ตัวคูณ	ความคลาดเคลื่อน	สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ
ดำ	0	10^0		
น้ำตาล	1	10^1	$\pm 1\%$	100 ppm
แดง	2	10^2	$\pm 2\%$	50 ppm
ส้ม	3	10^3	$\pm 3\%$	15 ppm
เหลือง	4	10^4	$\pm 4\%$	25 ppm
เขียว	5	10^5	$\pm 0.5\%$	

สี	ค่า	ตัวคูณ	ความคลาดเคลื่อน	สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ
ฟ้า	6	10^6	$\pm 0.25\%$	
ม่วง	7	10^7	$\pm 0.1\%$	
เทา	8	10^8		
ขาว	9	10^9		
เงิน		10^{-1}	$\pm 10\%$	
ทอง		10^{-2}	$\pm 5\%$	

ตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Sensitivity) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$k = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทาน T คืออุณหภูมิในหน่วย เซลเซียส และหน่วยของค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ k ที่นิยมใช้คือหน่วยต่อล้านต่อองศาเซลเซียส (Parts per Million per Degree Celsius, ppm/ $^{\circ}\text{C}$) โดยทั่วไปตัวต้านทานแบบคาร์บอนมีค่า k ประมาณ $-400 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$

โดยทั่วไปเรานิยมอธิบายการเปลี่ยนค่าของความต้านทานกับอุณหภูมิโดยอาศัยสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ (Temperature Coefficient, α) ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของวัสดุต่างๆ โดยที่เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างได้จาก

$$R_{T_2} = R_{T_1} [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (2.10)$$

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของวัสดุต่างๆ ที่ 20°C (293.15K)

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ(α)
เงิน	3.8×10^{-3}
ทองแดง	3.93×10^{-3}
ทอง	3.4×10^{-3}
อลูมิเนียม	3.91×10^{-3}
นิกเกิล	6×10^{-3}
ทังสเตน	5×10^{-3}
เหล็ก	5.5×10^{-3}

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวต้านทาน เมื่อกำหนดทิศทางตามหลักการสัญญาณเครื่องหมายพาสซีฟ คือ

$$p = vi = v \left(\frac{v}{R} \right) = \frac{v^2}{R} \quad (2.11)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งจาก $v = Ri$ ได้ดังนี้

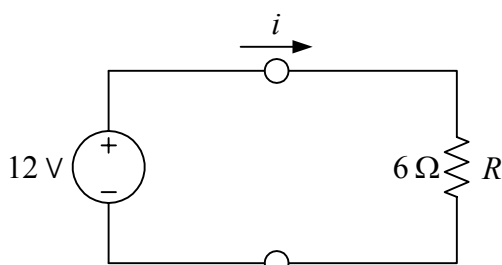
$$p = vi = (Ri)i = i^2 R \quad (2.12)$$

เมื่อนำนิยามของการเป็นอุปกรณ์พาสซีฟเข้ามาพิจารณาจะพบว่า สมการสำหรับพลังงานที่ส่งให้กับตัวต้านทานคือ

$$w = \int_{-\infty}^t p d\tau = \int_{-\infty}^t i^2 R d\tau \quad (2.13)$$

เนื่องจาก i^2 จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ทำให้ค่าพลังงานที่ส่งให้ตัวต้านทานมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ คือไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับส่วนอื่นๆ ของวงจรได้นั่นเอง

ตัวอย่าง 2.5 พิจารณาแบบจำลองวงจรของระบบไฟฟ้าในรถยนต์คันหนึ่งดังแสดงในรูป Ex 2.5 เมื่อปล่อยให้หลอดไฟหน้าเปิดไว้ ถ้าปล่อยให้ระยะเวลาหนึ่งแบตเตอรี่จะหมดในที่สุด เนื่องจากหลอดไฟซึ่งสามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทานตัวหนึ่งจะใช้พลังงานที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่จนหมด ถ้าแรงดันของแบตเตอรี่ในรถยนต์มีค่า 12 V หลอดไฟหน้ามีความต้านทาน 6 โอห์ม จงหาค่ากระแสที่ไหลในวงจร กำลังและพลังงานที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ Ex 2.5

วิธีทำ จากกฎของโอห์ม ในสมการที่ 2.5 จะได้ว่า

$$v = Ri \quad \therefore i = \frac{12}{6} = 2 \text{ A}$$

กำลังที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ไปยังหลอดไฟหาได้จาก

$$p = vi = 12 \times 2 = 24 \text{ W}$$

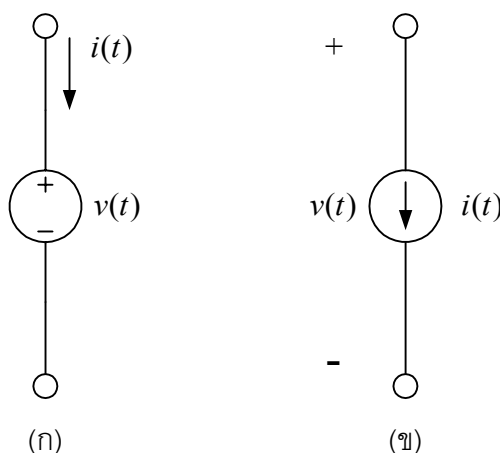
และสามารถหาพลังงานที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงได้จาก

$$w = \int_0^t vi \, d\tau = 24t$$

$$= 24(60 \times 60 \times 4) = 3.46 \times 10^5 \text{ J}$$

2.4 แหล่งจ่ายแบบอิสระและแบบขึ้นกับค่าตัวแปรอื่น

อุปกรณ์บางชนิดได้รับการออกแบบมาเพื่อเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับวงจร เราเรียกอุปกรณ์เหล่านี้ว่า แหล่งจ่าย (Source) ซึ่งอาจแบ่งออกเป็นสองชนิดคือแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) และแหล่งจ่ายกระแส (Current Source) รูปที่ 2.12 (ก) แสดงสัญลักษณ์วงจรของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งจะมีการกำหนดค่าแรงดันส่วนค่ากระแสจะขึ้นอยู่กับส่วนอื่นๆ ของวงจร การกำหนดค่าของแรงดันทำได้โดยการเขียนสมการของ $v(t)$ ซึ่งหมายถึงค่าแรงดันที่เป็นค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลา เช่น $v(t) = 5$ หรือ $v(t) = 10\cos 100t$ หรือ $v(t) = 5t - 2$ เป็นต้น ในกรณีที่ $v(t)$ เป็นค่าคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาจะเรียกว่าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (DC Voltage Source)



รูปที่ 2.12 สัญลักษณ์วงจรของแหล่งจ่ายแบบอิสระ (ก) แหล่งจ่ายแรงดัน (ข) แหล่งจ่ายกระแส

รูปที่ 2.12 (ข) แสดงแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งจะมีการกำหนดค่ากระแสส่วนค่าแรงดันจะขึ้นอยู่กับส่วนอื่นๆ การกำหนดค่าของกระแสทำได้โดยการเขียนสมการของ $i(t)$ ในทำนองเดียวกันกับแหล่งจ่ายแรงดัน เช่น $i(t) = -4$ หมายถึงกระแส 4 A ไหลในทิศทางตรงข้ามกับลูกศรในรูป (ไหลออกจากขั้วบวกของแรงดัน)

2.4.1 แหล่งจ่ายแบบอิสระ

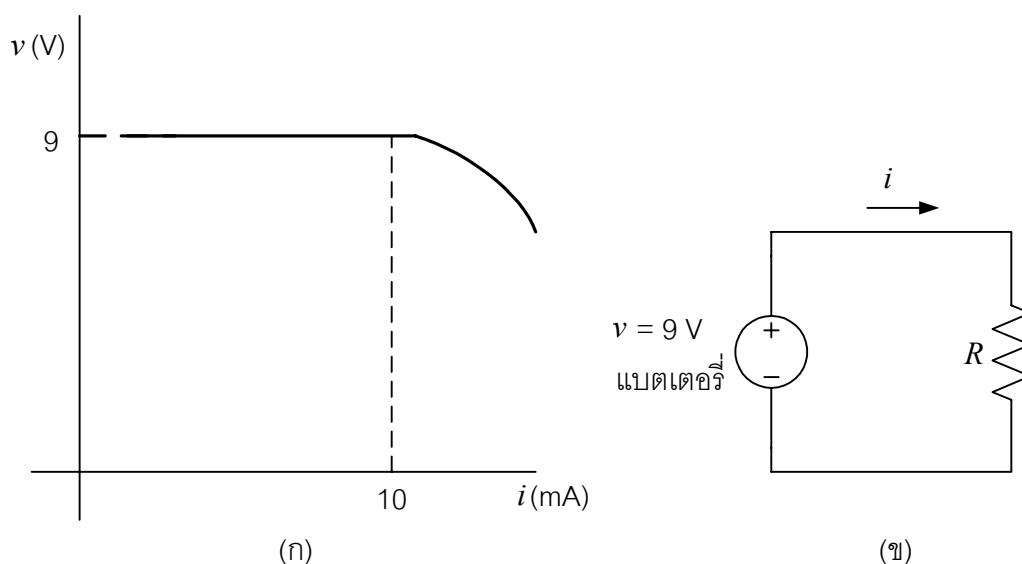
แหล่งจ่ายเป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เนื่องจากมันสามารถจ่ายพลังงานได้ แหล่งจ่ายแบบอิสระ (Independent Source) เป็นแหล่งจ่ายซึ่งให้ค่ากระแสหรือแรงดันที่กำหนดโดยสมการของ $i(t)$ หรือ $v(t)$ แล้วแต่กรณี โดยไม่ขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ ในวงจร ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ 6 V อาจถือเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบ

อิสระ เนื่องจากมันจะจ่ายแรงดัน 6 V ในขณะที่กระแสที่ไหลจะยังไม่ทราบค่าเนื่องจากจะขึ้นอยู่กับส่วนอื่นของวงจร อาจมีค่ามากเมื่อต่อกับวงจรหนึ่ง และมีค่าน้อยเมื่อต่อกับอีกวงจรหนึ่งก็ได้

ตัวอย่างของแบตเตอรี่นี้ยกเป็นตัวอย่างง่ายๆ ยังไม่ได้้นำความซับซ้อนที่จะเกิดกับแบตเตอรี่จริงในกายภาพ เช่น ค่าแรงดันของแบตเตอรี่อาจขึ้นอยู่กับอายุของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ ความคลาดเคลื่อนในกระบวนการผลิต และปริมาณกระแสที่จ่ายขณะนั้น เป็นต้น ควรพิจารณาและทำความเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างแบตเตอรี่จริง(หรือแหล่งจ่ายจริงในทางกายภาพ) กับแหล่งจ่ายแบบอิสระในรูปแบบอย่างง่ายที่เรากล่าวถึงข้างต้นในหัวข้อนี้ คงจะเป็นการดีมากหากแหล่งจ่ายจริงในทางกายภาพมีคุณสมบัติเหมือนแหล่งจ่ายง่าย ๆ ในทฤษฎีหรือทางอุดมคติข้างต้น เพื่อให้แยกความแตกต่างได้เราจะเรียกแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแสที่แนะนำในหัวข้อนี้ว่าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ

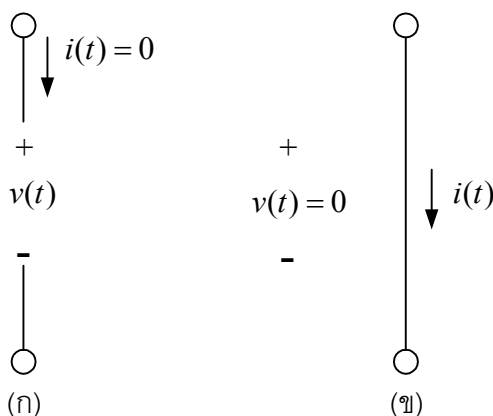
ตัวอย่าง 2.6 ถ้าหากถูกถามว่าการแทนแบตเตอรี่ 9 V ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน 9 V ในอุดมคติ ในการใช้งานทั่วไป โดยไม่คิดผลของ อายุของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ ความคลาดเคลื่อนในกระบวนการผลิต และปริมาณกระแสที่จ่ายขณะนั้น เป็นการแทนที่สมเหตุสมผลหรือไม่ จะมีวิธีการตอบคำถามนี้อย่างไร ?

วิธีทำ หากทำการวัดค่าแรงดันจริงของแบตเตอรี่ขณะจะใช้งานด้วยโวลต์มิเตอร์ก็จะสามารถกำหนดผลจากอายุของแบตเตอรี่ และความคลาดเคลื่อนในกระบวนการผลิต ออกไปได้ ความผิดพลาดที่เหลือจะเกิดจากปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรที่นำมาต่อ และอุณหภูมิ ในสภาพการใช้งานปกติ อุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากนักจึงตัดทิ้งไปก่อนในการวิเคราะห์เบื้องต้น เพื่อความง่ายในการอธิบาย จะสมมติว่าวัดค่าแรงดันจริงของแบตเตอรี่ได้ 9 V พอดี ขณะยังไม่ได้จ่ายกระแส ขั้นตอนต่อมาคือต่อวงจรดังรูป Ex 2.6 (ก) เพื่อทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานซึ่งเมื่อหารด้วยค่าความต้านทานก็จะได้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรตามกฎของโอห์ม แบตเตอรี่ในอุดมคติจะต้องจ่ายแรงดันคงที่เสมอไม่ว่าจะจ่ายกระแสเท่าใดก็ตาม ในทางปฏิบัติค่าแรงดันของแบตเตอรี่จะลดลงเมื่อจ่ายกระแสเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานภายในตัวแบตเตอรี่นั่นเอง ผลการทดลองจะมีลักษณะดังรูป Ex 2.6 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อต่อความต้านทานที่มีค่าลดลง (ส่งผลให้กระแสไหลมากขึ้น) จนเมื่อค่ากระแสถึงค่าหนึ่ง i_m แรงดันจะตกลงอย่างมากจากการทดลองนี้ทำให้สรุปได้ว่าทราบได้ว่าการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ยังไม่เกินค่า i_m การแทนแบตเตอรี่ 9 V ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน 9 V ในอุดมคติ จะให้ผลการคำนวณถูกต้อง ในกรณีที่ต้องการใช้งานที่ค่ากระแสมากกว่า i_m จะต้องหาแบบจำลองใหม่ซึ่งจะคิดผลของความต้านทานภายในตัวแบตเตอรี่เข้ามาด้วย



รูปที่ Ex 2.6

จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่าวิศวกรมักจะประสบปัญหาต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่ง ในการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด แบบจำลองอย่างง่ายมักจะไม่ถูกต้องเท่ากับแบบจำลองที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองที่ยู่ยากซับซ้อนมากเกินไปอาจทำให้การคำนวณยุ่งยากหรือเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นกฎง่ายๆ สำหรับการเลือกก็คือควรเลือกแบบจำลองที่ง่ายก่อน หากไม่ได้ผลตามต้องการจึงค่อยเปลี่ยนแปลงไปใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 2.13 กรณีพิเศษของแหล่งจ่ายในอุดมคติ

(ก) แหล่งจ่ายกระแส $i(t) = 0$ แทนด้วยความต้านทานเปิดวงจร

(ข) แหล่งจ่ายแรงดัน $v(t) = 0$ แทนด้วยความต้านทานปิดวงจร

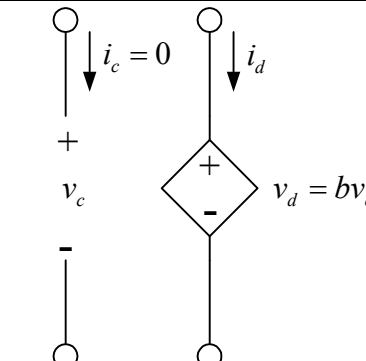
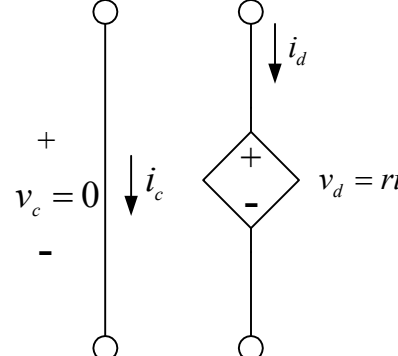
รูปที่ 2.13 แสดงกรณีพิเศษสองกรณีของแหล่งจ่ายในอุดมคติ รูป (ก) เป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเหมือนกับตัวต้านทานที่มีค่าอนันต์ หรือความต้านทานเปิดวงจร ส่วนรูป (ข) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเหมือนกับตัวต้านทานที่มีค่าศูนย์ หรือความต้านทานปิดวงจรมันเอง ตัวต้าน

ทานเปิดวงจรและปิดวงจรสามารถปรากฏในวงจรได้โดยไม่ทำให้วงจรเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4.2 แหล่งจ่ายแบบขึ้นกับค่าตัวแปรอื่น

แหล่งจ่ายแบบขึ้นกับค่าตัวแปรอื่นประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วนคือองค์ประกอบส่วนควบคุม (Controlling Element) และองค์ประกอบส่วนถูกควบคุม (Controlled Element) องค์ประกอบส่วนควบคุมจะเป็นตัวเปิดวงจรหรือปิดวงจรในกรณีที่องค์ประกอบส่วนถูกควบคุมจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดัน ดังนั้นจึงมีได้ทั้งหมดสี่แบบคือแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Voltage Source, VCVS) แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส (Current-Controlled Voltage Source, CCVS) แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Current Source, VCCS) และแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยกระแส (Current-Controlled Current Source, CCCS) ตาราง 2.5 แสดงแหล่งจ่ายทั้งสี่แบบพร้อมทั้งสัญลักษณ์วงจร สังเกตว่าจะใช้สัญลักษณ์แตกต่างจากแหล่งจ่ายอิสระ

ตาราง 2.5 แหล่งจ่ายแบบขึ้นกับค่าตัวแปรอื่น

ชนิด	สัญลักษณ์วงจร
แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน ค่า b คือ อัตราขยายของ VCVS มีหน่วยเป็น V/V	
แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส ค่า r คือ อัตราขยายของ CCVS มีหน่วยเป็น V/A	

ชนิด	สัญลักษณ์วงจร
แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน ค่า g คือ อัตราขยายของ VCCS มีหน่วยเป็น A / V	
แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยกระแส ค่า d คือ อัตราขยายของ CCCS มีหน่วยเป็น A/A	

ตัวอย่าง 2.7 จงหาค่ากำลังที่ได้รับหรือจ่ายให้กับองค์ประกอบต่างๆ ในวงจร และแสดงให้เห็นว่ากำลังที่จ่ายให้จะเท่ากับกำลังที่ได้รับพอดี

วิธีทำ พิจารณาองค์ประกอบ B ซึ่งมีทิศทางอ้างอิงตามหลักการพาสซีฟ สามารถหาค่ากำลังที่ องค์ประกอบ B ได้รับดังนี้

$$p_B = 15 \times 5 = 75 \text{ W (รับ)}$$

ส่วนองค์ประกอบ A ซึ่งมีทิศทางอ้างอิงไม่เป็นไปตามหลักการพาสซีฟ สามารถหาค่ากำลังที่ องค์ประกอบ A จ่ายให้กับวงจรดังนี้

$$P_A = 20 \times 2 = 40 \text{ W (จ่าย)}$$

แหล่งจ่าย 5 V มีกระแส 2 A ไหลเข้าสู่ขั้วบวกแสดงว่าได้รับกำลังจากวงจร

$$P_{5V} = 5 \times 2 = 10 \text{ W (รับ)}$$

และสุดท้ายแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส มีกระแสไหลออกจากขั้วบวก แสดงว่าจ่ายกำลังไฟฟ้า

$$P_X = 3 \times 3i_x = 3 \times 3(5) = 45 \text{ W (จ่าย)}$$

ดังนั้นกำลังจ่ายทั้งหมดคือ

$$P_{\text{จ่าย}} = P_X + P_A = 45 + 40 = 85 \text{ W}$$

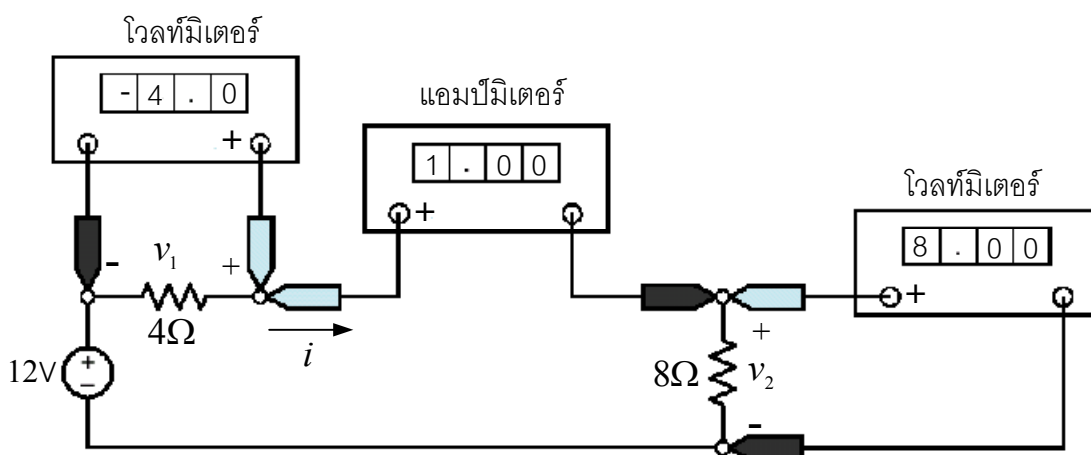
และกำลังรับทั้งหมดคือ

$$P_{\text{รับ}} = P_B + P_{SV} = 75 + 10 = 85 \text{ W}$$

สรุปได้ว่ากำลังจ่ายและกำลังรับมีค่าเท่ากันพอดี

2.5 โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

การวัดค่ากระแสและแรงดันทำได้โดยการต่อโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งมิเตอร์โดยทั่วไปจะมีสายต่อสองสี คือสีแดงหมายถึงขั้วบวกและสีดำหมายถึงขั้วลบหากไม่ทราบค่าที่จะวัดมีค่าเท่าไร ให้ตั้งค่าช่วงการวัดของมิเตอร์ไว้ที่ตำแหน่งสูงสุด ยกเว้นมิเตอร์ที่มีการหาช่วงการวัดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.14 การต่อโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

ในกรณีการวัดแรงดัน เราจะต่อขั้วสีแดงเข้ากับขั้วบวกขององค์ประกอบที่ต้องการจะวัดค่าแรงดัน และขั้วสีดำเข้ากับขั้วลบขององค์ประกอบนั้น หากต่อสลับกันจะอ่านค่าได้เป็นลบสำหรับมิเตอร์แบบตัวเลข และเข็มจะชี้กลับด้านในกรณีมิเตอร์แบบเข็ม ดังนั้นในกรณีการใช้มิเตอร์แบบเข็มจึงควรระมัดระวังในเรื่องการต่อมิเตอร์ให้ถูกทิศทาง

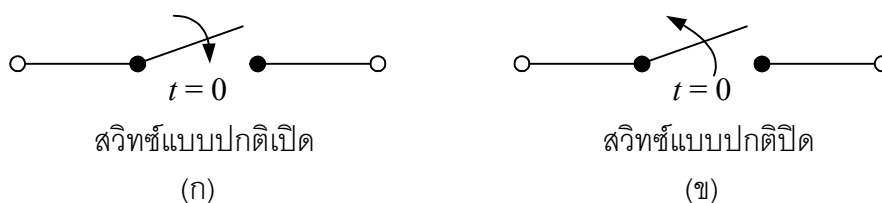
ในกรณีของการวัดกระแสจะต้องต่อวงจรให้กระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบที่ต้องการจะวัดค่ากระแส มาไหลผ่านแอมป์มิเตอร์โดยการต่ออนุกรม และจะต้องให้กระแสไหลเข้ามิเตอร์ทางขั้วสีแดง หากต่อสลับขั้วจะอ่านค่าได้เป็นลบสำหรับมิเตอร์แบบตัวเลข และเข็มจะชี้กลับด้านในกรณีมิเตอร์แบบเข็ม เช่นเดียวกับโวลต์มิเตอร์ ดังนั้นในกรณีการใช้มิเตอร์แบบเข็มจึงควรระมัดระวังเป็นพิเศษในเรื่องการต่อมิเตอร์ให้ถูกทิศทาง นอกจากนี้ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งของการใช้แอมป์มิเตอร์ คือต้องต่ออนุกรมกับองค์

ประกอบที่จะทำการวัดค่ากระแสไหลผ่านเท่านั้น ห้ามต่อเข้ากับวงจรแบบขนานเป็นอันตราย เพราะอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่แอมป์มิเตอร์นั้นได้

2.6 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

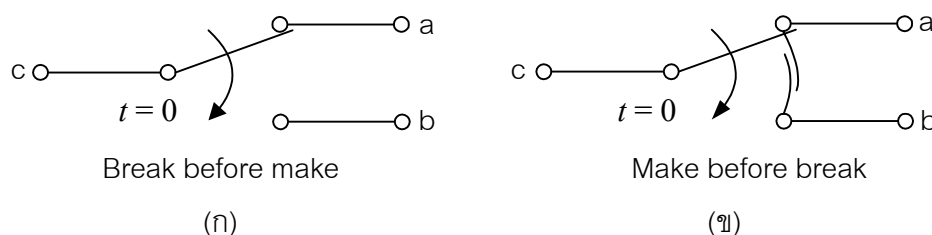
2.6.1 สวิตช์

สวิตช์มีสถานะสองสถานะคือ ปิดและเปิด ในทางอุดมคติสวิตช์ จะทำตัวเหมือนปิดวงจรเมื่ออยู่ในสถานะปิด และจะทำตัวเหมือนเปิดวงจรเมื่ออยู่ในสถานะเปิด รูปที่ 2.15 แสดงสวิตช์รูปแบบต่างๆ ในแต่ละชนิดจะมีการเขียนกำกับเวลาที่สวิตช์เปลี่ยนตำแหน่งไว้ด้วย พิจารณา รูปที่ 2.15 (ก) ซึ่งเป็นสวิตช์แบบชั่วคราวเดียวทางเดียว (Single-Pole Single-Throw, SPST) จะอยู่ในสภาวะปกติเปิด และจะเปลี่ยนสถานะคือจะปิดเมื่อเวลาถึงที่กำหนด ในที่นี้คือ $t = 0$ s ถ้าเราใช้แบบจำลองในอุดมคติแทนสวิตช์ มันจะถูกพิจารณาเป็นเปิดวงจรเมื่อ $t < 0$ และเป็นปิดวงจรเมื่อ $t > 0$ นอกจากนี้แบบจำลองสวิตช์ในอุดมคติจะสามารถเปลี่ยนสถานะได้ในทันที ส่วนในรูปที่ 2.15 (ข) เป็นสวิตช์แบบชั่วคราวเดียวทางเดียว แต่จะอยู่ในสภาวะปกติปิด และจะเปลี่ยนสถานะเป็นเปิดที่เวลา $t = 0$ s



รูปที่ 2.15 สวิตช์แบบชั่วคราวเดียวทางเดียว

(ก) แบบปกติเปิด (ข) แบบปกติปิด



รูปที่ 2.16 สวิตช์แบบชั่วคราวเดียวสองทาง

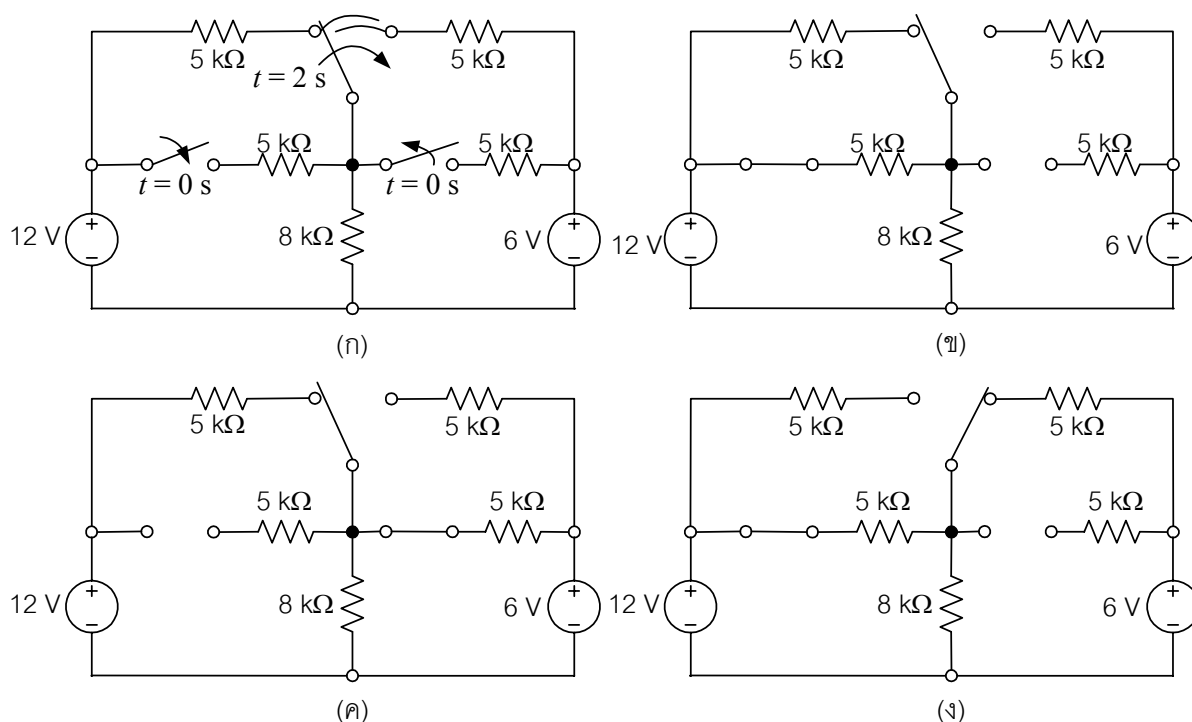
(ก) แบบจากก่อนแตะ (Break before Make) (ข) แบบแตะก่อนจาก (Make before Break)

ในรูปที่ 2.16 (ก) เป็นสวิตช์แบบชั่วคราวเดียวสองทาง (Single-Pole Double-Throw, SPDT) แบบจากก่อนแตะ (Break before Make) สวิตช์แบบนี้จะทำงานเหมือนสวิตช์แบบชั่วคราวเดียวทางเดียวสองตัว ตัวหนึ่งต่อระหว่างขั้ว c และ a อีกตัวหนึ่งระหว่างขั้ว c และ b เมื่อ $t < 0$ สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ a จะปิด และสวิตช์ระหว่างขั้ว c และ b จะเปิด เมื่อ $t > 0$ สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะกัน นั่นคือ สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ a

จะเปิด และสวิตช์ระหว่างขั้ว c และ b จะปิด ในทำนองเดียวกันสวิตช์แบบนี้ก็จะแทนด้วยแบบจำลองในอุดมคติของสวิตช์

ในงานบางอย่างจะเกิดความแตกต่างเมื่อสวิตช์ระหว่างขั้ว c และ b แตะกันก่อนหรือหลังจากที่สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ a แยกจากกัน ดังนั้นจึงใช้สัญลักษณ์แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ b แตะกันก่อน สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ a แยกจากกัน และ (ง) สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ b แตะกันหลังจาก สวิตช์ระหว่างขั้ว c และ a แยกจากกัน หรือเรียกสั้นๆ ว่าแบบแตะก่อนจาก (Make before Break)

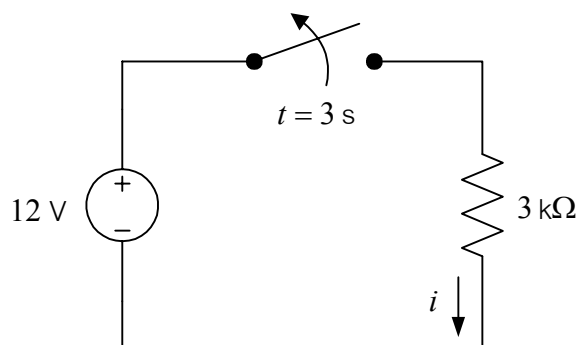
ตัวอย่าง 2.8 จากรูป Ex 2.8 (ก) เป็นการแสดงการใช้เปิดวงจรและปิดวงจรเป็นแบบจำลองแทนสวิตช์ในอุดมคติ



รูปที่ Ex 2.8

วิธีทำ รูป Ex 2.8 (ก) แสดงวงจรที่มีสวิตช์สามตัวอยู่ในวงจร รูป Ex 2.8 (ข) แสดงวงจรขณะ $t < 0$ รูป Ex 2.8 (ค) แสดงวงจรในช่วงเวลา $0 < t < 2$ s และรูป Ex 2.8 (ง) แสดงวงจรหลังจากเวลา $t = 2$ s ($t > 2$ s)

ตัวอย่าง 2.9 จากรูป Ex 2.9 จงหาค่ากระแสในวงจรที่เวลา $t = 1$ s และ $t = 5$ s

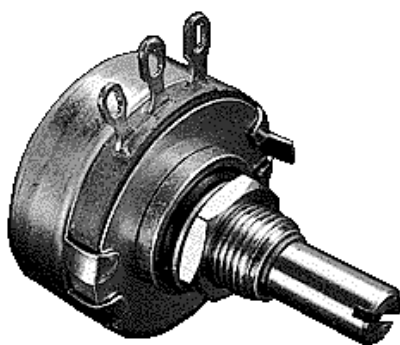


รูปที่ Ex 2.9

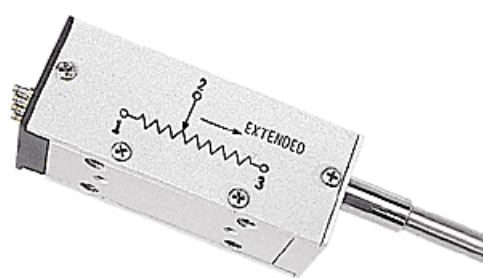
วิธีทำ ที่เวลา $t = 1$ s สวิตช์ปิด ดังนั้นกระแสจะมีค่า $i = \frac{2}{3k\Omega} = 4 \text{ mA}$ และที่เวลา $t = 5$ s สวิตช์จะเปิด ดังนั้นกระแสจะมีค่า $i = 0 \text{ mA}$

2.6.2 ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Potentiometer) คือตัวต้านทานที่มีขั้วต่อที่สาม ซึ่งสามารถจะเลื่อนไปมาบนตัวต้านทานนั้น รูปที่ 2.17 แสดงตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่นิยมใช้ทั่วไป โดยจะมีการปรับเลื่อนสองแบบคือ (ก) แบบเชิงเส้น และ (ข) แบบหมุน และมีสัญลักษณ์วงจรในรูปที่ 2.18 (ก) และวงจรเสมือนในรูปที่ 2.18 (ข) มีค่าพารามิเตอร์สองตัวที่จะใช้อธิบายการทำงานของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ค่าแรกคือ R_p ซึ่งหมายถึงค่าความต้านทานของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้เมื่อวัดระหว่างขั้วอยู่กับที่ทั้งสอง ค่าที่สองคือสัดส่วน a ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วที่เลื่อนได้ ค่า 0 และ 1 หมายถึงตำแหน่งขั้วปลายสุดทั้งสอง ดังนั้นเมื่อตำแหน่งการเลื่อนอยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ค่าความต้านทานระหว่างขั้วทั้งสามจะปรากฏดังรูปที่ 2.18 (ข)



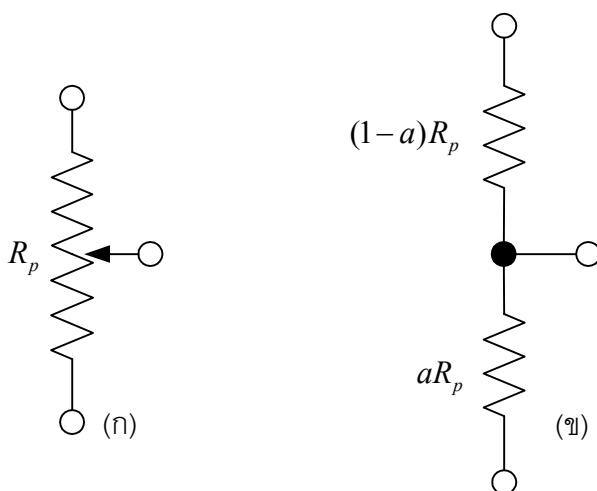
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.17 ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

(ก) แบบหมุน (ข) แบบเชิงเส้น

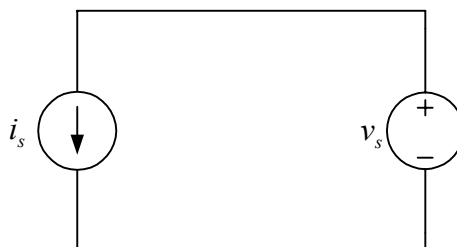


รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์วงจรของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

(ก) สัญลักษณ์วงจร (ข) วงจรเสมือน

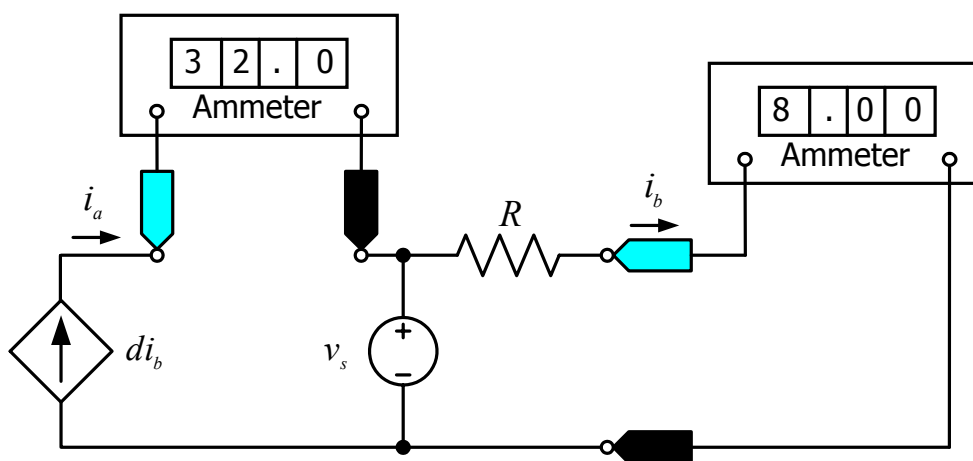
2.7 แบบฝึกหัดท้ายบท

- องค์ประกอบหนึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน $v = \sqrt{i}$ จงหาว่าองค์ประกอบนี้เป็นองค์ประกอบเชิงเส้นหรือไม่
- กระแสไหลเข้าสู่ขั้วบวกขององค์ประกอบหนึ่งคือ $i = 2 \sin(t - \pi)$ A สำหรับ $t \geq 0$ และ $i = 0$ สำหรับ $t < 0$ แรงดันตกคร่อมองค์ประกอบนี้คือ $v = 2 \frac{di}{dt}$ จงหาว่าองค์ประกอบนี้เป็นองค์ประกอบพาสซีฟหรือแอกทีฟ
- ตัวทำความร้อนไฟฟ้าตัวหนึ่งต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 250 V จะใช้กำลัง 1000 W ต่อมานำตัวทำความร้อนไฟฟ้านี้ไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 210 V จงหาว่าตัวทำความร้อนไฟฟ้าจะใช้กำลังจากแหล่งจ่ายนี้เท่าใด และตัวทำความร้อนนี้มีค่าความต้านทานเท่าใด
- แหล่งจ่ายกระแสอิสระ i_s และแหล่งจ่ายแรงดันอิสระ v_s ต่อขนานกันในวงจรดังรูป P2.4 จงหาว่าแหล่งจ่ายแต่ละแหล่งจะจ่ายกำลังออกมาเท่าใด กำหนดให้ $v_s = 10$ V และ $i_s = 3$ A



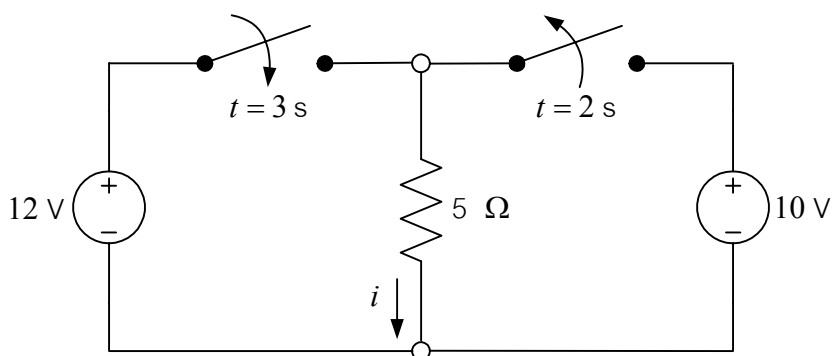
รูปที่ P2.4

- แอมป์มิเตอร์ในรูป P2.5 อ่านค่าได้ $i_a = 32$ A และ $i_b = 8$ A จงหาค่าอัตราขยายกระแส d ของแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยกระแส



รูปที่ P2.5

6. จงหาค่ากระแสที่เวลา $t = 1$ s และ $t = 4$ s ของวงจรในรูป P2.6



รูปที่ P2.6