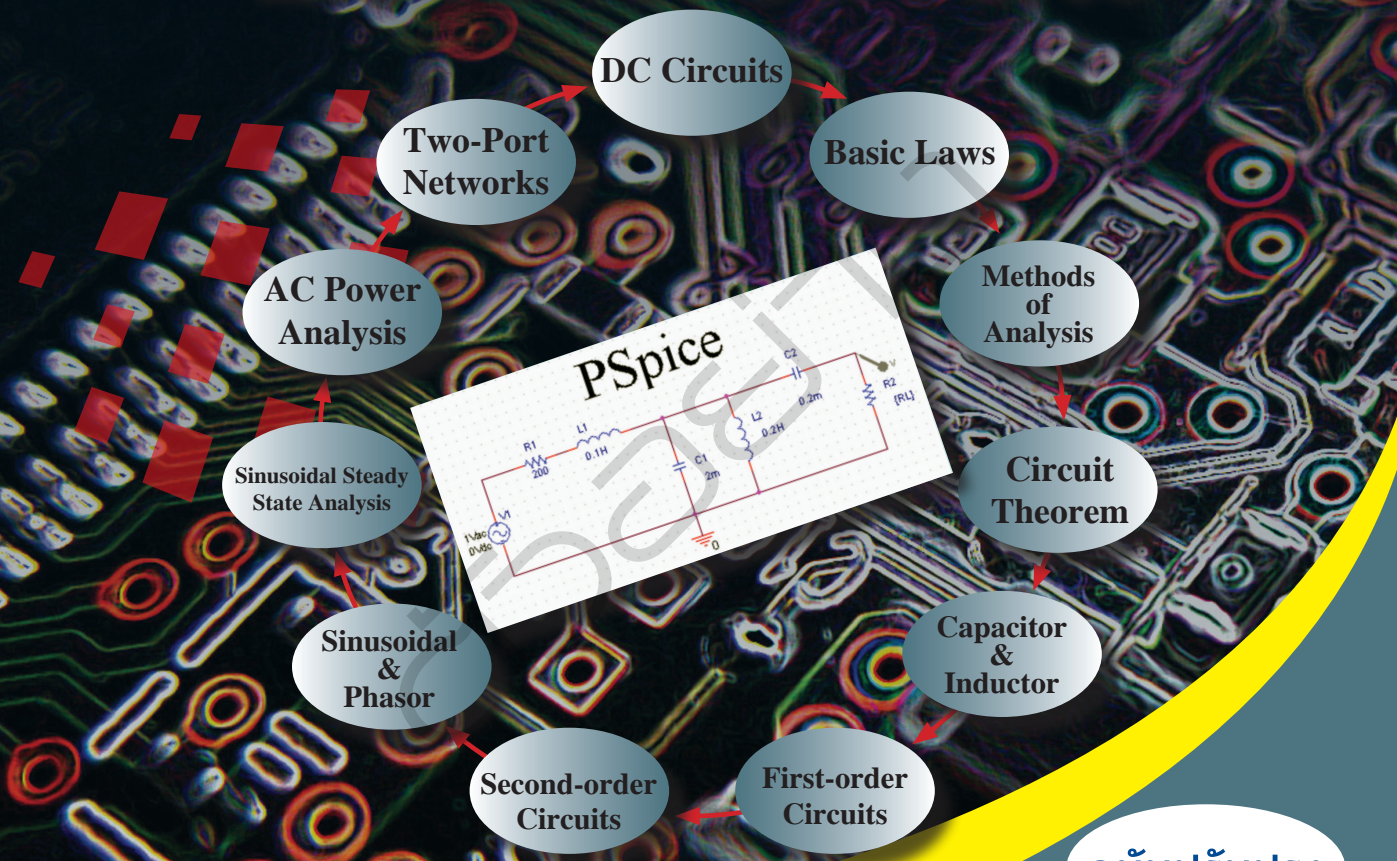
D.K. knowledge series

วงจรไฟฟ้า

Electric Circuits



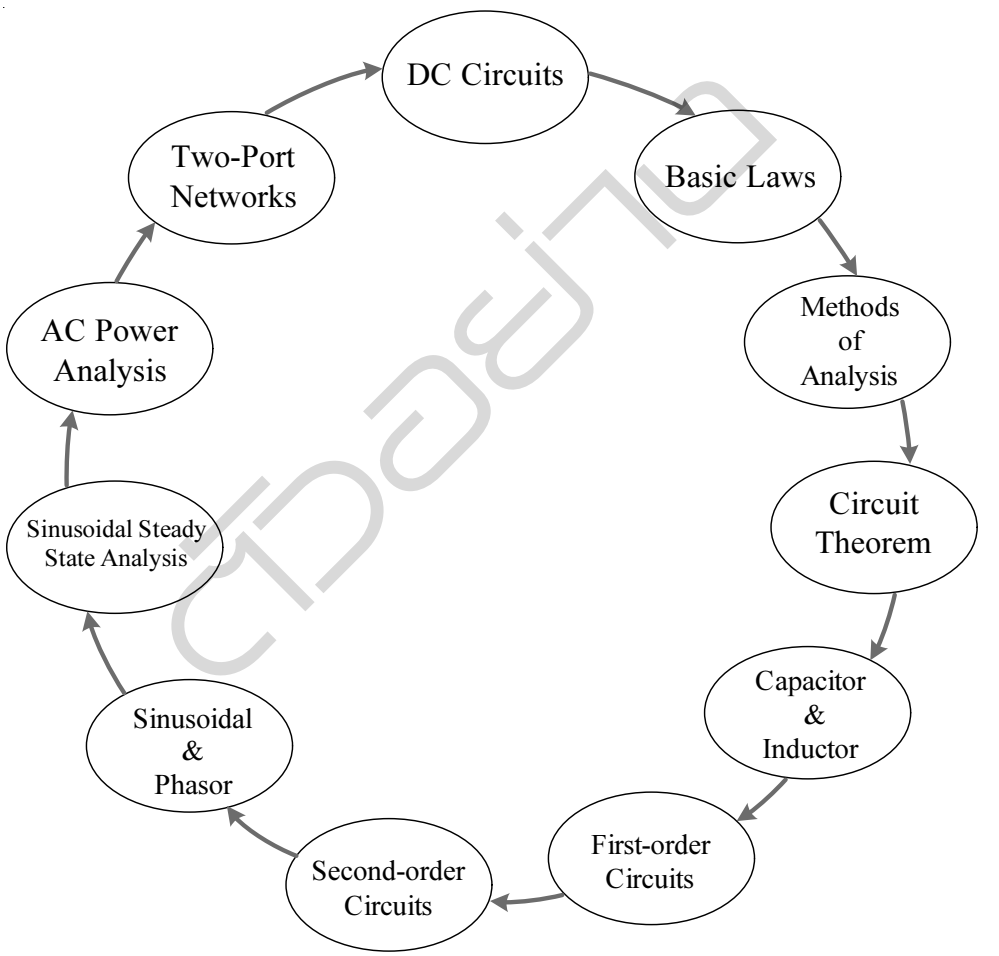
ฉบับปรับปรุง

- เนื้อหาละเอียด อ่านเข้าใจง่าย
- เหมาะเป็นบทเรียนในชั้นเรียน วิทยาลัยเทคนิค และคณะวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกสถาบัน
- สามารถนำหนังสือเล่มนี้ไปใช้เรียนในชั้นเรียนได้หลายสถาบันชั้นนำ

รศ.ดร.อภินันท์ อุรโสภณ

ดวงกมลพับลิชชิ่ง
นำเสนอหนังสือดี มีคุณค่า

วงจรไฟฟ้า
(Electric Circuits)



รศ.ดร.อภินันท์ อุรโสภณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คำนำสำนักพิมพ์

หนังสือวงจรไฟฟ้าเล่มนี้จะมีประโยชน์มากสำหรับผู้เรียนที่จะใช้เป็นคู่มือเรียนและศึกษาค้นคว้า เพื่อนำมาปฏิบัติและทดลอง ท่านอาจารย์ผู้สอนก็สามารถนำหนังสือวงจรไฟฟ้าเล่มนี้ เป็นบทเรียนในชั้นเรียนของนักเรียน นักศึกษาได้เลย เนื้อหาละเอียด อ่านเข้าใจง่าย เพราะผู้เขียนเป็นนักปฏิบัติจริง และสามารถรู้จุดบกพร่องที่นักเรียน นักศึกษาเข้าใจยาก เขียนให้เข้าใจง่ายขึ้น

ท่านผู้อ่านที่สนใจจะไปค้นคว้าด้วยตนเองก็นำไปอ่าน ปฏิบัติใช้ในชีวิตประจำวันได้ เพื่ออาชีพจะได้พัฒนาให้เก่งขึ้น

หนังสือวงจรไฟฟ้ายังเหมาะสำหรับไว้ค้นคว้า เพื่อเก็บไว้ในห้องสมุดเพื่อนำไปอ้างอิง

สำนักพิมพ์หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้ดีและมีประโยชน์สำหรับทุกท่านแน่นอน

ด้วยความปรารถนาดี

สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิ่ง

ตัวอย่าง

คำนำ

หนังสือวงจรไฟฟ้าเล่มนี้ ได้เรียบเรียงขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ความสามารถในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าได้ โดยองค์ประกอบเนื้อหาประกอบด้วย กฎพื้นฐาน ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าชนิดสะสมพลังงาน วงจรอันดับหนึ่ง วงจรอันดับสอง สัญญาณไซนูซอยด์และเฟสเซอร์ การวิเคราะห์สัญญาณไซนูซอยด์ในสถานะอยู่ตัว กำลังไฟสลับและโครงข่ายสองทางเข้า-ออก นอกจากนี้เนื้อหาในแต่ละบทยังได้สอดแทรกการจำลองวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจและสามารถนำมาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาที่ใช้ประกอบการเรียนรายวิชาเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าตามสมควร

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์นิสิต ตันติรัตนไพศาล ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานีที่ได้ประศาสตร์วิชาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ในขณะที่ผู้เขียนเรียนในระดับประกาศ--นียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ที่วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี กราบขอบพระคุณอาจารย์ประศาสน์ ลูกอินทร์ และอาจารย์ประสาท พลค้อ ที่เปิดโอกาสให้ผู้เขียนได้ทำการสอนวิชาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าในขณะที่ผู้เขียนเป็นอาจารย์จ้างสอนพิเศษที่วิทยาลัยเทคนิคอำนาจเจริญ ซึ่งถือว่าเป็นการทบทวนเนื้อหาและเพิ่มพูนประสบการณ์อันดียิ่ง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ผู้เขียนรักในอาชีพการสอน ท้ายที่สุดกราบขอบพระคุณอาจารย์วันไชย คำเสน ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขหนังสือให้มีความถูกต้องมากขึ้น

อภินันท์ อุรโสภณ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 บทนำ 1
1.2 วงจรไฟฟ้าและหน่วย 1
1.3 ประจุ 3
1.4 กระแสไฟฟ้า 3
1.5 แรงดันไฟฟ้า 5
1.6 กำลังและพลังงาน 5
1.7 องค์ประกอบวงจรไฟฟ้า 7

บทที่ 2 กฎพื้นฐาน **9**

2.1 บทแนะนำ 9
2.2 กฎของโอห์ม 9
2.3 โนด บรานช์และลูป 14
2.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ 14
2.5 ตัวต้านทานต่อแบบอนุกรมและการแบ่งแรงดัน 19
2.6 ตัวต้านทานต่อแบบขนานและการแบ่งกระแส 21
2.7 โปรแกรม PSPICE 26

บทที่ 3 วิธีการวิเคราะห์ **31**

3.1 บทแนะนำ 31
3.2 การวิเคราะห์แบบโนด 31
3.3 การวิเคราะห์ซุปเปอร์โนด 37
3.4 การวิเคราะห์แบบเมช 41
3.5 การวิเคราะห์แบบเมชกับแหล่งจ่ายกระแส 46
3.6 การจำลองโปรแกรม 48

บทที่ 4 ทฤษฎีวงจร **51**

4.1 บทแนะนำ 51
4.2 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น 51

4.3 ซุปเปอร์โพซิชั่น 53
4.4 การเปลี่ยนรูปแหล่งจ่าย 58
4.5 ทฤษฎีเทวินิน 61
4.6 ทฤษฎีนอร์ตัน 68
4.7 การส่งผ่านกำลังสูงสุด 74
4.8 จำลองโปรแกรม PSpice 78

บทที่ 5 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ 83

5.1 บทแนะนำ 83
5.2 ตัวเก็บประจุ 83
5.3 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมและขนาน 87
5.4 ตัวเหนี่ยวนำ 89
5.5 การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมและขนาน 91

บทที่ 6 วงจรอันดับหนึ่ง 95

6.1 บทแนะนำ 95
6.2 วงจร *RC* ขณะไม่มีแหล่งจ่าย 95
6.3 วงจร *RL* ขณะไม่มีแหล่งจ่าย 101
6.4 ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย 105
6.5 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของวงจร *RC* *107*
6.6 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของวงจร *RL* *112*
6.7 การวิเคราะห์วงจรอันดับหนึ่งด้วย PSpice 117

บทที่ 7 วงจรอันดับสอง 121

7.1 บทแนะนำ 121
7.2 การหาค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย 122
7.3 วงจร *RLC* ขณะไม่มีแหล่งจ่าย 125
7.4 วงจรขนาน *RLC* ขณะไม่มีแหล่งจ่าย 132
7.5 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของวงจรอนุกรม *RLC* 138
7.6 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของวงจรขนาน *RLC* 144
7.7 วงจรอันดับสองทั่วไป 147
7.8 การจำลองด้วยโปรแกรม PSpice 150

บทที่ 8 ไซนูซอยด์และเฟสเซอร์ **153**

8.1 บทแนะนำ 153
8.2 ไซนูซอยด์ 153
8.3 เฟสเซอร์ 157
8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์กับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้า 161
8.5 อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ 164
8.6 การรวมอิมพีแดนซ์ 167

บทที่ 9 การวิเคราะห์สถานะอยู่ตัวสัญญาณไซนูซอยด์ **171**

9.1 บทแนะนำ 171
9.2 การวิเคราะห์แบบโนด 171
9.3 การวิเคราะห์แบบเมช 173
9.4 ทฤษฎีซุปเปอร์โพซิชั่น 174
9.5 การเปลี่ยนรูปแหล่งจ่าย 177
9.6 วงจรสมมูลย์เทวินินและนอร์ตัน 178
9.7 การวิเคราะห์วงจรไฟสลับด้วย PSpice 180

บทที่ 10 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ **183**

10.1 บทแนะนำ 183
10.2 กำลังชั่วขณะและกำลังเฉลี่ย 183
10.3 การส่งผ่านกำลังเฉลี่ยสูงสุด 186
10.4 ค่าประสิทธิผล 189
10.5 กำลังที่ปรากฏและองค์ประกอบกำลัง 192
10.6 กำลังเชิงซ้อน 194
10.7 กำลังไฟสลับ 197
10.8 การแก้ไของค์ประกอบกำลัง 199

บทที่ 11 เน็ทเวิร์คสองพอร์ต **205**

11.1 บทแนะนำ 205
11.2 ตัวแปรอิมพีแดนซ์ (Impedance Parameters) 205
11.3 ตัวแปรแอดมิตแตนซ์ (Admittance Parameters) 209
11.4 ตัวแปรผสมผสาน (Hybrid Parameters) 213
11.5 ตัวแปรสายส่ง (Transmission Parameters) 216

11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Relationships between Parameters) 220
11.7 การเชื่อมต่อเน็ทเวิร์ค (Interconnection of networks) 223
11.8 การจำลองตัวแปรเน็ทเวิร์คสองพอร์ตด้วยโปรแกรม PSpice 230

ภาคผนวก ก การจำลองโปรแกรมด้วย PSPICE 233

PSpice for Windows 233
ก.1 เริ่มต้นกับ PSpice 234
ก.2 การตั้งค่าการจำลองวงจร 237
ก.3 PSpice ในการวิเคราะห์โดเมนความถี่ 238
- ผลตอบสนองทางความถี่ 238
- โบดพล็อต (Bode Plot) ของผลตอบสนองทางความถี่ 240
- การเปลี่ยนโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ 241

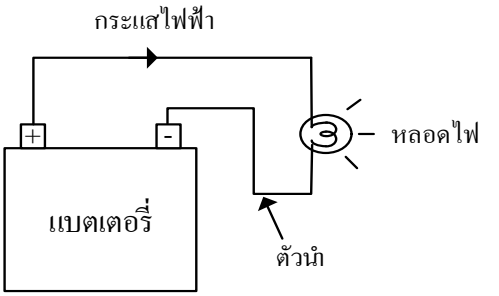
บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

ในทุกสาขาของวิศวกรรมไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นสาขาอิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม เครื่องมือวัด ระบบควบคุม คอมพิวเตอร์และไฟฟ้ากำลัง ล้วนแล้วแต่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีวงจรไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งที่ผู้เรียนต้องเข้าใจอย่างถ่องแท้ เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาวิชาในระดับสูงที่มีเนื้อหาซับซ้อนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าต่อไป เนื้อหาในบทนี้ผู้เขียนจะกล่าวถึงพื้นฐานนิยามความหมายของวงจรไฟฟ้า ปริมาณฟิสิกส์ทางไฟฟ้า เช่น หน่วยวัด ประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังและพลังงานไฟฟ้า

1.2 วงจรไฟฟ้าและหน่วย

วงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit) คือเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Electrical Source) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ภาระหรือโหลด (Load) โดยมีตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conduction) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับโหลด รูปที่ 1.1 แสดงวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยแบตเตอรี่และหลอดไฟฟ้า เมื่อต่อวงจรด้วยลวดตัวนำไฟฟ้าก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเกิดแสงสว่างขึ้น จากตัวอย่างที่แสดงในรูปเป็นเพียงวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายเท่านั้น หากแต่ในระบบไฟฟ้าทั่วไปตามบ้านเรือน ตามโรงงานอุตสาหกรรมจะมีความสลับซับซ้อนที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายหลายแหล่งจ่าย รวมทั้งการเชื่อมต่อกันของโหลดชนิดต่างๆ



รูปที่ 1.1 วงจรไฟฟ้า

ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณทางฟิสิกส์ของวงจรไฟฟ้าที่ถูกต้องและแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็น เช่น การวิเคราะห์ความสามารถในการจ่ายกำลังสูงสุดของแหล่งจ่าย ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้หลอดไฟสว่างได้ ความสามารถของลวดตัวนำไฟฟ้าในการทนต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นต้น เหล่านี้ล้วนเป็นปริมาณฟิสิกส์ทางไฟฟ้าที่เราต้องรู้เพื่อที่จะควบคุมปริมาณให้อยู่ในพิกัด และทำให้เกิดการใช้จ่ายพลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

หน่วยวัด (Measurement Unit) คือหน่วยที่ใช้บ่งบอกปริมาณฟิสิกส์ ซึ่งในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะหน่วยวัดระบบ SI (International System of Units, SI) ซึ่งในระบบนี้มี 7 หน่วยที่เป็นหน่วยพื้นฐาน ในขณะที่หน่วยอื่นๆ ก็สามารถหาได้จาก 7 หน่วยพื้นฐานนี้ ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณ หน่วยวัด และสัญลักษณ์

ตารางที่ 1.1 หน่วยวัดพื้นฐานในระบบ SI

หน่วยพื้นฐาน SI		
ปริมาณ (Quantity)	หน่วยพื้นฐาน (Basic unit)	สัญลักษณ์ (Symbol)
ความยาว (Length)	เมตร (meter)	m
มวล (Mass)	กิโลกรัม (kilogram)	kg
เวลา (Time)	วินาที (second)	s
กระแสไฟฟ้า (Electric current)	แอมแปร์ (ampere)	A
อุณหภูมิ (Thermodynamic temperature)	เคลวิน (kelvin)	K
ความเข้มแสง (Luminous intensity)	แคนเดลา (candela)	cd
ปริมาณของสสาร (Substance)	โมล (Mole)	mol

ข้อดีของระบบ SI คือ สามารถแสดงหน่วยขนาดที่ใหญ่หรือเล็กกว่าหน่วยมูลฐานได้ ดังแสดงในตารางที่ 1.2 สำหรับตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

100,000,000 mA เท่ากับ 100,000 A หรือเท่ากับ 100 kA

ตารางที่ 1.2 คำนำหน้าหน่วย

พหุคูณ (Multiplier)	**คำนำหน้า (Prefix)**	**สัญลักษณ์ (Symbol)**
10^{12}	tera	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
103	kilo	k
10	deka	da
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p

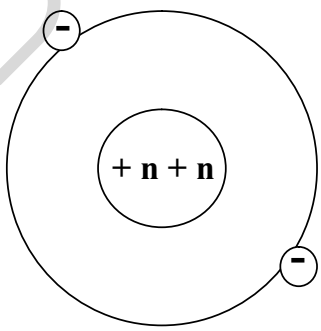
1.3 ประจุ

ประจุ (Charge) คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอะตอมมีหน่วยวัดคือคูลอมบ์ (Coulombs, C) โดยที่อะตอมคืออนุภาคที่เล็กที่สุดของสสารซึ่งมีอนุภาคมูลฐาน 3 อนุภาคคือ โปรตอน (Protons, p) ซึ่งแสดงคุณสมบัติไฟฟ้าเป็นบวกหรือเราอาจเรียกว่าประจุบวกและอิเล็กตรอน (Electrons, e) ซึ่งแสดงประจุลบและนิวตรอน (Neutrons, n) แสดงคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ตารางที่ 1.3 แสดงสัญลักษณ์ มวล คุณสมบัติทางไฟฟ้าและขนาดของอนุภาคมูลฐานในอะตอม

ตารางที่ 1.3 แสดงสมบัติของอนุภาคมูลฐานในอะตอม

อนุภาค	สัญลักษณ์	มวล		ประจุไฟฟ้า(q)	
		(กรัม)	(a.m.u.)	คูลอมบ์ (C)	ชนิดของประจุ
โปรตอน	p	1.6725×10^{-24}	1.007274	1.602×10^{-19}	+1
นิวตรอน	n	1.6748×10^{-24}	1.008665	0	0
อิเล็กตรอน	e	9.09×10^{-28}	0.000549	1.602×10^{-19}	-1

อะตอมจะมีลักษณะเป็นวงกลมดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างโครงสร้างอะตอมของฮีเลียม (He) ประกอบไปด้วยโปรตรอนสองตัวและนิวตรอนสองตัวอยู่ภายในนิวเคลียส (Nucleus) โดยมีอิเล็กตรอนสองตัวโคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียส

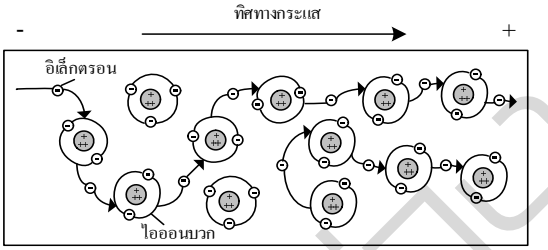


รูปที่ 1.2 โครงสร้างอะตอม

1.4 กระแสไฟฟ้า

จากโครงสร้างของอะตอมนั้นเราจะพบว่าอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียสนั้นมีโอกาสที่จะหลุดออกจากอะตอมได้ ถ้าหากมีแรงภายนอกมากระทำต่ออะตอม เช่น การนำไม้บรรทัดถูกับผ้าขนสัตว์ จากรูปที่ 1.1 แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถสะสมประจุไฟฟ้าบวกและลบโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อต่อเข้ากับโหลดก็จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออะตอมของตัวนำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนอิสระของตัวนำไฟฟ้าหลุดออกจากอะตอม ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ดังนั้น

กระแสไฟฟ้า (Electric current, *i*) ก็คือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยมีทิศทางจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังขั้วบวก แต่มีข้อตกลงทางวิศวกรรมไฟฟ้าว่ากระแสไฟฟ้าคือการเคลื่อนที่สุทธิของประจุบวกมีทิศทางจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ซึ่งอธิบายได้ว่าจากรูปที่ 1.3 ถ้าหากเราพิจารณาจากรูปทางด้านขวามือ เมื่ออะตอมตัวสุดท้ายสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้ตัวมันมีคุณสมบัติเป็นบวก ต่อมาอิเล็กตรอนอิสระของอะตอมตัวรองสุดท้ายหลุดออกไปสู่อะตอมตัวสุดท้าย ทำให้อะตอมตัวสุดท้ายกลายสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ในขณะที่อะตอมตัวรองสุดท้ายเป็นบวก ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่ากระแสไฟฟ้าคือการเคลื่อนที่สุทธิของประจุบวกซึ่งกฎนี้จะถูกใช้สำหรับการคำนวณของวงจรไฟฟ้า รวมทั้งระบบการวัดไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 1.3 การไหลของกระแสไฟฟ้า

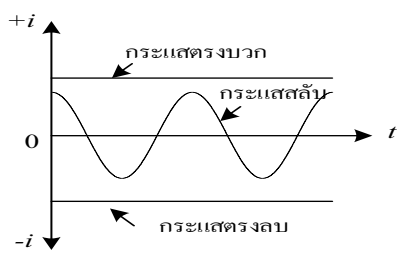
กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere, A) โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงประจุเทียบกับเวลา

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{A} \tag{1.1}$$

หนึ่งแอมแปร์เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุหนึ่งคูลอมบ์ต่อหนึ่งวินาที ในขณะเดียวกันประจุทั้งหมดที่ไหลออกจากจุดหนึ่ง ณ เวลา t_0 ไปยังอีกจุดหนึ่งที่เวลา t_1 เราสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (1.1) ได้ดังนี้

$$q = \int_{t_0}^{t_1} i\,dt \tag{1.2}$$

กระแสไฟฟ้ามีอยู่สองลักษณะคือกระแสที่มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเราเรียกกระแสในลักษณะนี้ว่ากระแสไฟตรงหรือไฟดีซี (Direct current, dc) ในทางตรงข้ามหากกระแสมีขนาดเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลา เราเรียกว่ากระแสไฟสลับหรือไฟเอซี (Alternating current, ac) ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ไฟกระแสตรงและกระแสสลับ

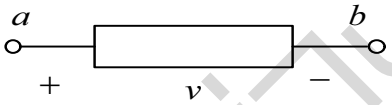
1.5 แรงดันไฟฟ้า

การที่อิเล็กตรอนไหลหรือเกิดการเคลื่อนที่ได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำต่ออะตอม แรงดังกล่าวนี้เราเรียกว่า แรงดันไฟฟ้า (Electromotive force, EMF) สมมุติวงจรไฟฟ้ามีอยู่สองขั้วคือขั้ว a และขั้ว b กำหนดแรงดันที่ตกคร่อมขั้วทั้งสองคือแรงดัน v_{ab} แรงดันนี้คือพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุจากจุด a ไปยังจุด b

$$v_{ab} = \frac{dw}{dq} \tag{1.3}$$

โดยที่ w คือพลังงานมีหน่วยเป็นจูล (Joules, J) และ q คือประจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb, C) ส่วน V คือแรงดันมีหน่วยเป็นโวลต์ (Voltage, V)

แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ = 1 จูล/คูลอมบ์



รูปที่ 1.5 ขั้วแรงดัน v_{ab} และ $-v_{ba}$

พิจารณารูปที่ 1.5 แสดงขั้วของแรงดัน โดยที่ขั้ว a มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ขั้ว b มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ แรงดันเดียวกันเราอาจเขียนได้สองแบบขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการให้แรงดันที่จุดใดเป็นแรงดันอ้างอิง เช่น $v_{ab} = v$ หมายความว่าเราให้ b เป็นจุดอ้างอิง ในทางตรงข้ามหากเราให้ a เป็นจุดอ้างอิงเราจะได้แรงดัน $v_{ba} = -v$

1.6 กำลังและพลังงาน

กำลังงาน (Power, p) คืออัตราการใช้พลังงานมีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (Watt, W) พิจารณาพลังงานที่เกิดขึ้นที่องค์ประกอบไฟฟ้าของวงจร สมมุติมีแรงดันตกคร่อม v โวลต์ และประจุ Δq เคลื่อนที่ผ่านองค์ประกอบนั้นจากขั้วบวกไปขั้วลบ ดังนั้นพลังงานที่ถูกองค์ประกอบดูดกลืน Δw

$$\Delta w = v\Delta q$$

ถ้าเวลาที่ใช้คือ Δt ดังนั้นอัตราของการใช้พลังงานหาได้จาก

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} v \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

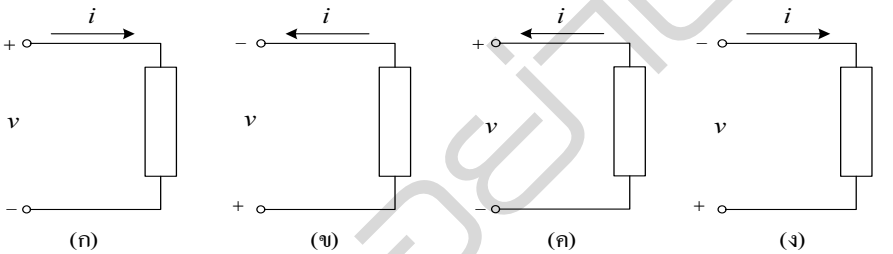
หรือ

$$\frac{dw}{dt} = v\frac{dq}{dt} = vi \tag{1.4}$$

ดังนั้นอัตราการใช้พลังงานคือ

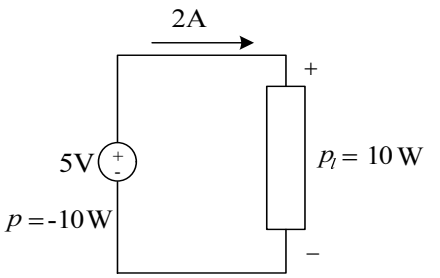
$$p = \frac{dw}{dt} = vi \qquad (1.5)$$

หน่วยของสมการที่ 1.5 คือ (J/C).(C/s) = J/s ซึ่งเท่ากับหนึ่งวัตต์ โดยปกติแล้ว v และ i จะเป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้น p จึงเป็นปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามเวลาด้วยบางครั้งจึงเรียก ว่ากำลังงานชั่วขณะ (Instantaneous power) ในการที่เราจะทราบว่ากำลังงานถูกจ่ายให้แก่องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าหรือองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าตัวนั้นจ่ายกำลังงานออกมา เราจำเป็นต้องทราบขั้วของแรงดันและทิศทางที่กระแสไหลผ่านองค์ประกอบวงจรไฟฟ้านั้น พิจารณารูปที่ 1.6 (ก) และ (ข) สมมุติแรงดันตกคร่อมองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าคือ v และกระแสที่ไหลผ่านคือ $+i$ จะได้กำลังงานคือ $p = +vi$ แสดงว่าองค์ประกอบเป็นตัวดูดกลืนกำลังงาน ในขณะที่รูปที่ 1.6 (ค) และ (ง) กระแสมีเครื่องหมายเป็นลบเพราะไหลจากขั้วลบไปหาขั้วบวก ดังนั้นจะได้กำลังงานที่เกิดขึ้นคือ $p = -vi$ นี้แสดงว่าองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าเป็นตัวแจกจ่ายกำลังงานออกมา



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้วของแรงดันและทิศทางกระแส

เพื่อง่ายต่อความเข้าใจพิจารณารูปที่ 1.7 สมมุติมีองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน v เท่ากับ 5 V จ่ายให้องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าและเกิดกระแส i เท่ากับ 2 A พิจารณาที่ตัวองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าจะได้กำลังงานคือ $p_l = 10$ W. แต่ในขณะที่ตัวแหล่งแรงดันจะได้ $p = -10$ W. สรุปได้ว่าตัวองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าเป็นตัวดูดกลืนกำลังงานและตัวแหล่งจ่ายแรงดันเป็นตัวแจกจ่ายกำลังงาน



รูปที่ 1.7 วงจรสำหรับพิจารณากำลังดูดกลืนและแจกจ่าย

จากกฎของพลังงานกล่าวว่า ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังงานในวงจร ณ ช่วงเวลาใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งความหมายก็คือกำลังงานที่ถูกดูดกลืนเท่ากับกำลังงานที่แจกจ่าย

$$\sum p = 0 \tag{1.6}$$

จากสมการที่ (1.5) พลังงานที่ดูดกลืนหรือแจกจ่ายโดยองค์ประกอบของวงจรจากเวลา t_0 ถึง t หาได้ดังนี้

$$w = \int_{t_0}^{t} p = \int_{t_0}^{t} vidt \tag{1.7}$$

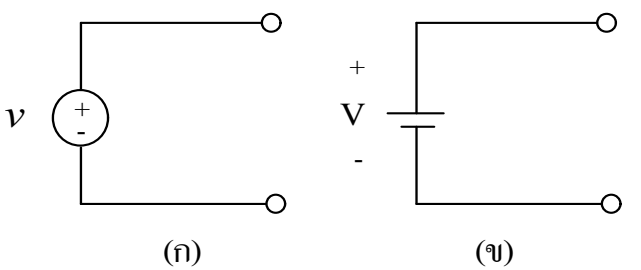
พลังงาน w คือความสามารถในการทำงาน มีหน่วยเป็นจูล (Joules, J) การวัดพลังงานไฟฟ้าจะวัดเทียบกับเวลาคือวัตต์ต่อชั่วโมง (Watt-hours, Wh)

$$1\text{Wh} = 3{,}600\text{J}$$

1.7 องค์ประกอบวงจรไฟฟ้า

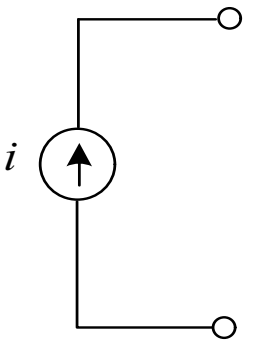
องค์ประกอบวงจรไฟฟ้ามีอยู่สองแบบคือแบบพาสซีฟ (Passive element) และแบบแอคตีฟ (Active element) แบบแอคตีฟคือสามารถกำเนิดพลังงานได้ แต่แบบพาสซีฟไม่สามารถกำเนิดพลังงานได้ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ส่วนตัวอย่างขององค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแบบแอคตีฟ เช่น เครื่องกำเนิด แบตเตอรี่และอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่นทรานซิสเตอร์หรือออป แอมป์ เป็นต้น องค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแบบแอคตีฟที่สำคัญก็คือแหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แหล่งจ่ายอิสระ (Independent source) และแหล่งจ่ายไม่อิสระ (Dependent source)

แหล่งจ่ายแรงดันอิสระคือองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าสองขั้ว โดยแรงดันที่ขั้วทั้งสองไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรใดๆ ในวงจร สัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายแรงดันอิสระ (ก) ใช้แทนแรงดันคงที่หรือแรงดันที่แปรตามเวลา (ข) ใช้แทนแรงดันคงที่ (dc)

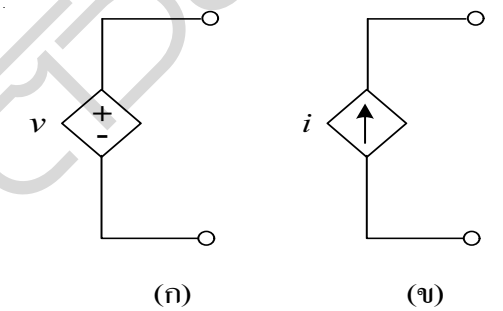
รูปที่ 1.9 แสดงสัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายกระแสอิสระ โดยที่หัวลูกศรแสดงทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 1.9 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายกระแสอิสระ

แหล่งจ่ายไม่อิสระคือองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าแบบแอคตีฟสองขั้ว โดยแรงดันหรือกระแสที่ขั้วทั้งสองถูกควบคุมด้วยแรงดันหรือกระแสอื่นๆ ในวงจร สัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 1.10 แหล่งจ่ายไม่อิสระแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน (A voltage-controlled voltage source, VCVS)
2. แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส (A current-controlled voltage source, CCVS)
3. แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (A voltage-controlled current source, VCCS)
4. แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยกระแส (A current-controlled current source, CCCS)



รูปที่ 1.10 สัญลักษณ์แหล่งจ่ายไม่อิสระ

บทที่ 2
กฎพื้นฐาน

2.1 บทแนะนำ

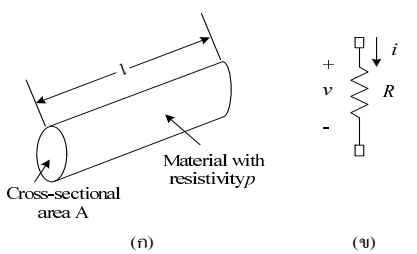
ในบทที่ 1 ได้แนะนำนิยามพื้นฐานของวงจรไฟฟ้า เช่น กระแส แรงดัน กำลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าและองค์ประกอบวงจรไฟฟ้า ซึ่งการที่เราจะสามารถกำหนดค่าปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านี้ให้ได้ตามความต้องการของวงจรไฟฟ้านั้น ก่อนอื่นเราต้องเข้าใจกฎพื้นฐานของวงจรไฟฟ้าที่สำคัญอย่าง เช่น กฎของโอห์ม (Ohm's Law) และกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงกฎพื้นฐานเหล่านี้ รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐาน เช่น วงจรอนุกรม วงจรขนาน รวมทั้งวงจรผสม นอกจากนี้แล้วเนื้อหาในบทนี้ยังได้แนะนำโปรแกรม PSpice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จะนำมาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรไฟฟ้า

2.2 กฎของโอห์ม

วัสดุทั่วไปมีคุณสมบัติในการต้านการไหลของประจุไฟฟ้า คุณสมบัติหรือความสามารถต่อการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ความต้านทาน (Resistance) โดยมีสัญลักษณ์ R ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด (Cross-sectional area, A มีหน่วยวัด คือ ตารางเมตร (m^2)) และความยาว (Length, l มีหน่วยวัดคือ เมตร (m)) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก ค่าความต้านทานหาได้ดังนี้

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.1}$$

โดยที่ ρ คือค่าความต้านทานเฉพาะของวัสดุมีหน่วยวัดคือ โอห์ม-เมตร วัสดุที่มีความต้านทานต่ำหรือมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีอย่างเช่น เงิน ทองแดง อลูมิเนียม ในขณะที่ไมกากับกระดาษมีความต้านทานสูง



รูปที่ 2.1 (ก) ตัวต้านทาน (ข) สัญลักษณ์ตัวต้านทาน

ตารางที่ 2.1 แสดงความต้านทานเฉพาะของวัสดุและคุณสมบัติที่จะนำไปใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือฉนวนหรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปตัวต้านทานจะถูกสร้างจากสารจำพวกโลหะผสมและสารประกอบคาร์บอน ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีพซึ่งสัญลักษณ์ตัวต้านทานแสดงในรูปที่ 2.1 (ข)

ตารางที่ 2.1 ความต้านทานของวัสดุ

ความต้านทานของวัสดุพื้นฐาน		
วัสดุ	ความต้านทาน ($\Omega - m$)	การนำไปใช้
เงิน	1.64×10^{-8}	ตัวนำ
ทองแดง	1.72×10^{-8}	ตัวนำ
อลูมิเนียม	2.8×10^{-8}	ตัวนำ
ทอง	2.45×10^{-8}	ตัวนำ
คาร์บอน	4×10^{-5}	กึ่งตัวนำ
เยอรมันเนียม	47×10^{-2}	กึ่งตัวนำ
ซิลิกอน	6.4×10^{2}	กึ่งตัวนำ
กระดาษ	10^{10}	ฉนวน
ไมกา	5×10^{11}	ฉนวน
แก้ว	10^{12}	ฉนวน
เทฟลอน	3×10^{12}	ฉนวน

Georg Simon Ohm (1787-1854) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันและความต้านทาน ซึ่งเรียกว่ากฎของโอห์ม (Ohm's law)

> *กฎของโอห์มแสดงให้เห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานตัวนั้น*

นั้นคือ

$$v \alpha i \qquad (2.2)$$

Ohm ได้ทดลองโดยการกำหนดให้ตัวต้านทานมีค่าความต้านทานคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) จะได้

$$v = iR \tag{2.3}$$

สมการที่ (2.3) เรียกว่ากฎของโอห์ม โดยที่ R มีหน่วยวัดเป็นโอห์ม Ω

*ความต้านทาน R แสดงถึงความสามารถต่อการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าขององค์ประกอบวงจรไฟฟ้าซึ่งมีหน่วยวัดเป็นโอห์ม Ω *

สมการที่ (2.3) อาจแสดงได้ดังนี้

$$R = \frac{v}{i} \tag{2.4}$$

ดังนั้น

$$1\Omega = 1\mathrm{V} / \mathrm{A}$$

เพื่อที่จะนำกฎของโอห์มดังสมการที่ (2.3) มาประยุกต์ใช้ ก่อนอื่นเราต้องพิจารณาทิศทางของกระแส i และขั้วของแรงดัน v ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 (ข) จะพบว่ากระแสจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าที่สูงไปหาศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าซึ่งจะได้ $v = iR$ ในทางตรงข้ามถ้าเรากำหนดทิศทางกระแสไหลจากศักย์ไฟฟ้าต่ำไปหาศักย์ไฟฟ้าสูงจะได้ $v = -iR$

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นว่าเราสามารถสร้างตัวต้านทาน R ให้มีค่าใดๆ ก็ได้ตามความต้องการในทางปฏิบัติเราจะถือว่าค่าความต้านทานต่ำสุดคือ $R = 0$ และสูงสุดคือ $R = \infty$ ซึ่งทั้งสองกรณีสามารถเกิดขึ้นได้ในวงจรไฟฟ้า รูปที่ 2.2 (ก) แสดงการพิจารณาค่า $R = 0$ เรียกว่าลัดวงจร (Short circuit)

$$v = iR = 0 \tag{2.5}$$

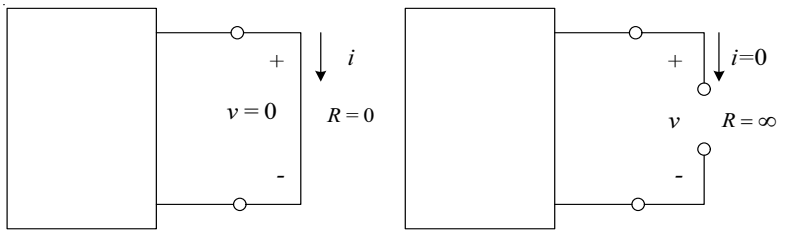
ซึ่งสมการแสดงให้เห็นว่าแรงดันเท่ากับศูนย์ถึงแม้ว่าจะมีกระแสไหลผ่านตัวมันก็ตาม ในทางปฏิบัติลัดวงจรเป็นการเชื่อมต่อสายตัวนำ

ลัดวงจรคือองค์ประกอบของวงจรไฟฟ้ามีความต้านทานเข้าใกล้ศูนย์

ในขณะที่ $R = \infty$ หมายถึงเปิดวงจร (Open circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)

$$i = \lim_{R \to \infty} \frac{v}{R} = 0 \tag{2.6}$$

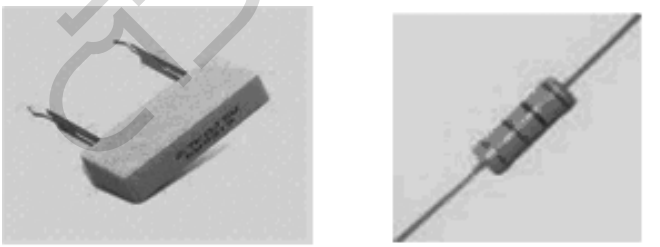
ซึ่งจากสมการชี้ให้เห็นว่ากระแสเท่ากับศูนย์แต่แรงดันสามารถเป็นค่าใดๆ ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเชื่อมต่อของวงจร



(ก) (ข)

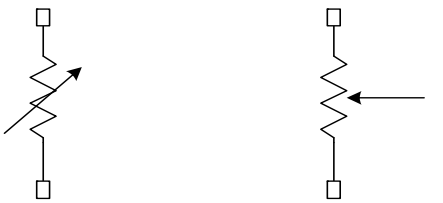
รูปที่ 2.2 (ก) ลัดวงจร (R=0) (ข) เปิดวงจร ($R = \infty$)

ตัวต้านทานแบ่งตามความสามารถในการปรับค่ามีอยู่สองแบบคือ 1) ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ ซึ่งสัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 2.1 (ข) โดยทั่วไปมีสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือชนิดไวร์วาวด์ (Wire-wound type) สร้างจากขดลวดพันบนแกนเซรามิค ซึ่งชนิดนี้มีค่าความต้านทานต่ำ สามารถทนกระแสสูงๆ ได้ และชนิดคอมโพซิชั่น (Composition type) สร้างจากการผสมกันของวัสดุจำพวกฟิล์ม คาร์บอนและโลหะ ตัวอย่างเช่น แบบฟิล์มคาร์บอน (Carbon film) สร้างจากการฉาบผงคาร์บอนลงบนแท่งเซรามิคแล้วทำการเคลือบด้วยฟิล์ม ซึ่งค่าความต้านทานจะสูง ทนกำลังวัตต์ตั้งแต่ 1/8 วัตต์ ถึง 2 วัตต์ มีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 Ω ถึง 100 MΩ 2) ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ สัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปคือโพเทนเชียลมิเตอร์ (Potentiometer) หรือพอต (Pot) สัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งมีขั้วต่อสามขั้วโดยที่ความต้านทานสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้โดยการเลื่อนจุดต่อของขั้วกลาง ตัวต้านทานแบบนี้มีทั้งเป็นชนิดไวร์วาวด์และชนิดคอมโพซิชั่น รูปที่ 2.5 แสดงตัวต้านทานที่ใช้งานทั่วไป



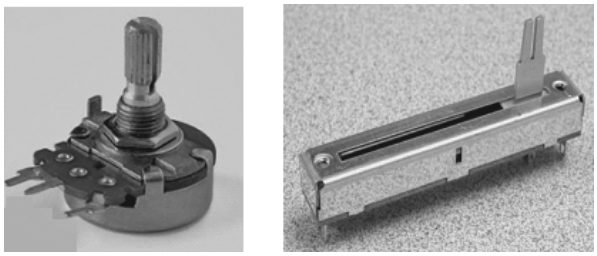
(ก) (ข)

รูปที่ 2.3 ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ (ก) ชนิดไวร์วาวด์ (ข) ชนิดคอมโพซิชั่น



(ก) (ข)

รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์สำหรับ (ก) ตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ทั่วไป (ข) โพเทนเชียลมิเตอร์



รูปที่ 2.5 ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

ปริมาณอีกอย่างหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์วงจรก็คือส่วนกลับของความต้านทาน R เรียกว่า ความนำ (Conductance, G)

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{v} \tag{2.7}$$

ความนำเป็นการวัดว่าอุปกรณ์แต่ละตัวว่าจะสามารถนำกระแสได้ดีเพียงใด หน่วยที่ใช้วัดมีอยู่ด้วยกันสองแบบคือ โมห์ (Mho, ℧) และหน่วยของ SI คือ ซีเมนต์ (Siemens, S)

$$1\ \text{S} = 1℧ = 1\text{A/V} \tag{2.8}$$

ความนำคือความสามารถของอุปกรณ์ต่อการนำกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโมห์หรือซีเมนต์

กำลังสูญเสียที่เกิดจากตัวต้านทานสามารถแสดงได้ในเทอมของ R

$$p = vi = i^2 R = \frac{v^2}{R} \tag{2.9}$$

หรือแสดงในเทอมของความนำ G

$$p = vi = v^2 G = \frac{i^2}{G} \tag{2.10}$$

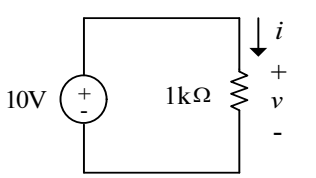
สรุป

1. กำลังสูญเสียในตัวต้านทานเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งในเทอมของกระแสหรือแรงดัน

2. ค่าของ R และ G เป็นปริมาณบวก ดังนั้นกำลังสูญเสียในตัวต้านทานจึงเป็นบวกเสมอ ตัวต้านทานจึงเป็นตัวดูดกลืนกำลังงานจากวงจร นั้นหมายความว่าตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ไม่สามารถกำเนิดพลังงานได้

ตัวอย่างที่ 2.1

จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.6 คำนวณกระแส i ความนำ G และกำลังงาน p



รูปที่ 2.6 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.1

วิธีทำ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย ดังนั้นเราสามารถหากระแส i ได้ดังนี้

$$i = \frac{v}{R} = \frac{10}{1\times10^3} = 10\ \ \text{mA}$$

ความนำ

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{1\times10^{3}} = 1 \text{ mS}$$

กำลังงาน

$$p = vi = 10(10\times10^{-3}) = 100 \text{ mW}$$

หรือ

$$p = i^2R = (10\times10^{-3})^2 1\times10^{3} = 100 \text{ mW}$$

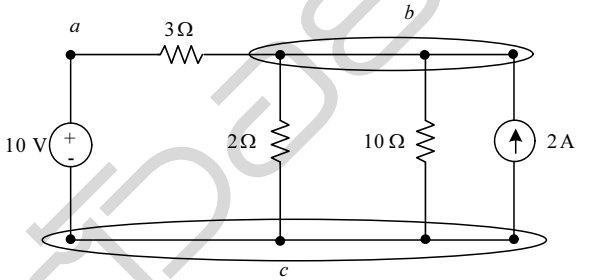
หรือ

$$p = v^2G = (10)^2 1\times10^{-3} = 100 \text{ mW}$$

2.3 โนด บรานช์และลูป

นิยาม

บรานช์หรือกิ่ง (Branch) แสดงถึงองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าหนึ่งตัว เช่น แหล่งจ่ายแรงดันหรือแหล่งจ่ายกระแสหรือตัวต้านทาน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 มีทั้งหมด 5 บรานช์คือแหล่งจ่ายแรงดัน 10-V แหล่งจ่ายกระแส 2-A และตัวต้านทาน 3 ตัว



รูปที่ 2.7 โนด กิ่ง และลูป

โนดหรือจุด (Node) คือจุดเชื่อมต่อกันระหว่างบรานช์สองตัวขึ้นไป วงจรในรูปที่ 2.7 มีอยู่สามโนด คือ โนด *a b* และ *c* โดยที่โนด b มีจุดเชื่อมต่อกันสามจุด ในขณะที่โนด *c* มีการเชื่อมต่อกันสี่จุด

ลูปหรือรอบวงปิด (Loop) คือรอบวงปิดใดๆ ในวงจร ตัวอย่างเช่น วงจรในรูปที่ 2.7 มีทั้งหมดสามลูปคือ ลูป *abca* ซึ่งกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน 3-Ω และ 2-Ω และแหล่งจ่าย 10-V โดยที่ลูป *bcb* มีสองลูปคือ ลูปที่กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน 2- และ 10-Ω และไหลผ่านตัวต้านทาน 10-Ω และแหล่งจ่ายกระแส 2-A

2.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์

นักฟิสิกส์เยอรมัน Guatav Robert Kirchhoff (1824–1887) เสนอกฎพื้นฐานซึ่งใช้ร่วมกับกฎของโอห์มสำหรับวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเรียกว่า กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) กฎที่หนึ่งอาศัย

หลักการพื้นฐานที่ว่าประจุไฟฟ้าไม่อาจสร้างหรือทำลายได้ และโนดของวงจรไฟฟ้าคือตัวนำที่ไม่มีความต้านทาน ไม่สามารถสะสมประจุหรือดูดกลืนพลังงานไว้ได้

> กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current law, KCL) กล่าวว่าผลรวมทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโนดใดๆ รวมกันเท่ากับศูนย์

สมการ KCL

$$\sum_{n=1}^{N} i_n = 0 \tag{2.11}$$

N คือจำนวนของบรานช์ที่เชื่อมต่อโนดและ i_n คือกระแสลำดับ n ที่ไหลเข้าหรือไหลออกที่โนดนั้นๆ โดยการกำหนดกระแสถ้าหากกำหนดกระแสไหลเข้าเป็นบวกกระแสไหลออกต้องเป็นลบ สมมุติมีเซทของกระแส $i_k(t), k = 1, 2, \ldots$ ไหลเข้าไปยังโนด ผลรวมทางพีชคณิตของกระแสที่โนดนั้นคือ

$$i_T(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + ... \tag{2.12}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.12) ทั้งสองข้างจะได้

$$q_T(t) = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + ... \tag{2.13}$$

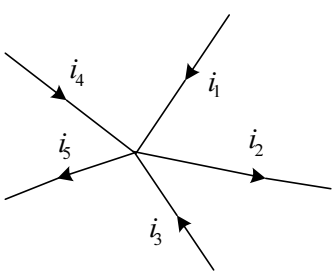
โดยที่ $q_k(t) = \int i_k(t)dt$ และ $q_T(t) = \int i_T(t)dt$ แต่กฎของประจุไฟฟ้ากล่าวว่าผลรวมทางพีชคณิตของประจุไฟฟ้าที่โนดต้องไม่เปลี่ยนแปลง โนดไม่สามารถสะสมหรือดูดกลืนพลังงานได้ ดังนั้น $q_T(t) = 0 \rightarrow i_T(t) = 0$ ซึ่งหมายความว่าที่โนดไม่มีประจุไฟฟ้า

พิจารณาโนดในวงจรรูปที่ 2.8 ใช้ KCL จะได้

$$i_1 + (-i_2) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0 \tag{2.14}$$

เพราะว่ากระแส i_1, i_3 และ i_4 ไหลเข้าโนด ในขณะที่กระแส i_2 และ i_5 ไหลออก จากสมการที่ (2.14) เขียนใหม่ได้

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5 \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.8 ทิศทางกระแสที่โนดแสดงด้วย KCL

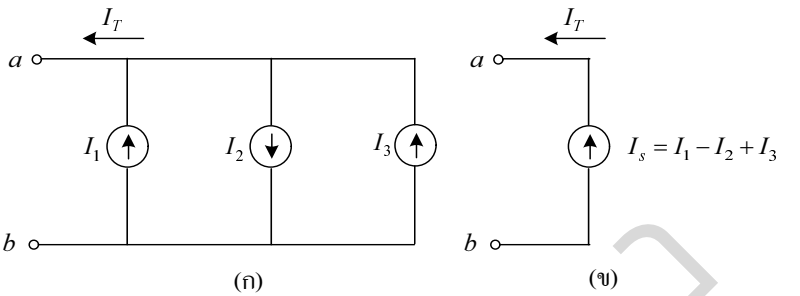
> ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าโนดเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากโนด

ตัวอย่างการประยุกต์ KCL ในการวิเคราะห์แหล่งจ่ายกระแสที่ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ใช้ KCL วิเคราะห์โนด *a*

$$I_T + I_2 = I_1 + I_3$$

หรือ

$$I_T = I_1 - I_2 + I_3 \tag{2.16}$$



รูปที่ 2.9 แหล่งจ่ายกระแสที่ต่อแบบขนาน (ก) วงจรเริ่มต้น และ (ข) วงจรสมมูลย์

ซึ่งแสดงเป็นวงจรสมมูลย์ได้ดังวงจรในรูปที่ 2.9 (ข) (แหล่งจ่ายกระแสไม่สามารถต่ออนุกรมกันได้ ยกเว้นมีค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งพิสูจน์ข้อยกเว้นนี้ได้โดยใช้ KCL)

กฎที่สองของเคอร์ชอฟฟ์ใช้หลักการพื้นฐานของกฎพลังงาน:

> กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law, KVL)
> กล่าวว่าผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันที่ลูปใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์

สมการ KVL

$$\sum_{m=1}^{M} v_m = 0 \tag{2.17}$$

M คือจำนวนแรงดันในลูปและ v_m คือแรงดันลำดับที่ *m* พิจารณาวงจรในรูปที่ 2.10 สมมุติว่าเราเริ่มต้นที่แหล่งจ่ายแรงดัน v_1 โดยมีทิศทางกระแสตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นเราจะได้แรงดัน $-v_1, +v_2, +v_3, -v_4$ และ $+v_5$ เขียนสมการ KVL ได้ดังนี้

$$-v_1 + v_2 + v_3 - v_4 + v_5 = 0 \tag{2.18}$$

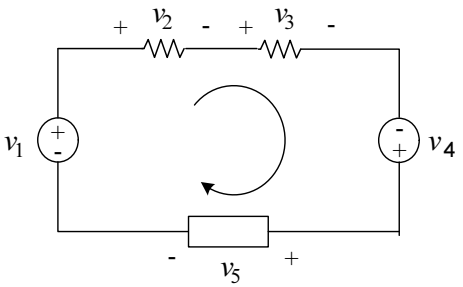
สมการที่ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้

$$v_2 + v_3 + v_5 = v_1 + v_4 \tag{2.19}$$

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า

> ผลรวมของแรงดันที่จ่ายในลูป = ผลรวมของแรงดันตกคร่อมโหลดในลูปนั้นๆ (2.20)

ในขณะเดียวกันเราก็สามารถที่จะกำหนดทิศทางกระแสทวนเข็มนาฬิกาได้ ซึ่งจะได้ $+v_1, -v_5, +v_4, -v_3$ และ $-v_2$ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเท่ากันกับผลลัพธ์ในสมการที่ (2.18) และ (2.19)



รูปที่ 2.10 แสดงลูปวงจรโดย KVL

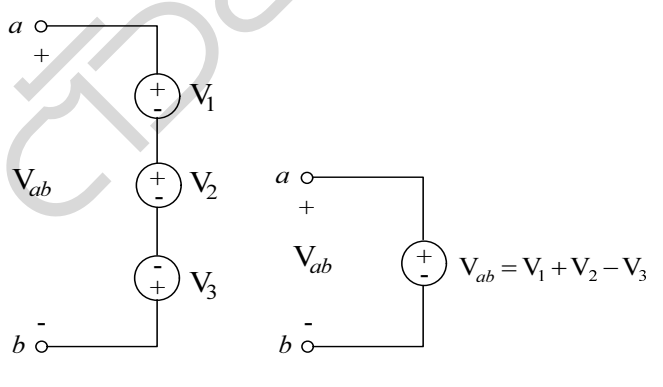
แหล่งจ่ายแรงดันต่ออนุกรมกันสามารถใช้ KVL เขียนวงจรสมมูลย์ได้ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.11

$$-V_{ab} + V_1 + V_2 - V_3 = 0$$

หรือ

$$V_{ab} = V_1 + V_2 - V_3 \qquad (2.21)$$

แหล่งจ่ายแรงดันไม่สามารถต่อกันแบบขนานได้ ยกเว้นมีค่าแรงดันเท่ากัน



รูปที่ 2.11 แหล่งจ่ายแรงดันต่อแบบอนุกรม (ก) วงจรเริ่มต้น และ (ข) วงจรสมมูลย์

ตัวอย่างที่ 2.2

จากวงจรในรูปที่ 2.12 (ก) คำนวณหา v_o และ v_x

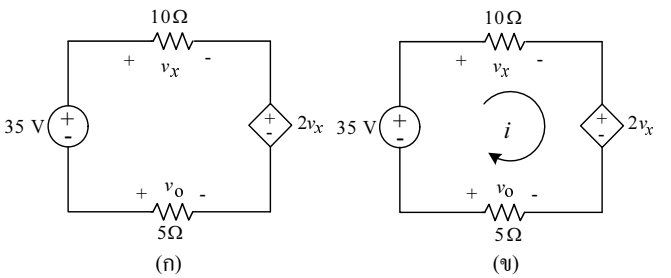
วิธีทำ

จากรูปที่ 2.12 (ข) ใช้ KVL วิเคราะห์ลูป

$$10i + 2v_x + 5i - 35 = 0 \qquad (2.2.1)$$

v_x คือแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน $10-\Omega$ ใช้กฎของโอห์มจะได้

$$v_x = 10i \tag{2.2.2}$$



รูปที่ 2.12 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.2

แทนสมการที่ (2.2.2) ลงในสมการที่ (2.2.1) จะได้

$$10i + 20i + 5i - 35 = 0 \;\Rightarrow\; i = 5 \quad \text{A}$$

ใช้กฎของโอห์มคำนวณ v_x และ v_o ได้ดังนี้

$$v_x = 10i = 10(5) = 50 \quad \text{V}, \;\; v_o = 5(-i) = 5(-1) = -5 \quad \text{V}$$

ตัวอย่างที่ 2.3

จากวงจรในรูปที่ 2.13 (ก) คำนวณหากระแสและแรงดัน

วิธีทำ

ใช้กฎของโอห์มและเคอร์ชอฟฟ์ในการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 2.13 (ข) ดังนี้

$$v_1 = 2i_1, \;\; v_2 = 8i_2, \;\; v_3 = 4i_3 \tag{2.3.1}$$

เขียนสมการกระแสที่โนด a โดยใช้ KCL จะได้

$$i_1 = i_2 + i_3 \tag{2.3.2}$$

ใช้ KVL เขียนสมการในลูปที่ 1

$$-5 + v_1 + v_2 = 0$$

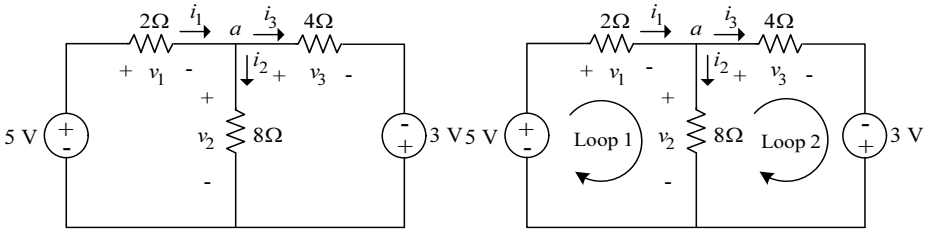
จากสมการที่ (2.3.1) นำ v_1 และ v_2 แทนสมการด้านบนจะได้

$$-5 + 2i_1 + 8i_2 = 0$$

$$i_1 = \frac{5 - 8i_2}{2} \tag{2.3.3}$$

ใช้ KVL เขียนสมการในลูปที่ 2

$$v_3 - 3 - v_2 = 0 \tag{2.3.4}$$



รูปที่ 2.13 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.3

นำ v_2 และ v_3 จากสมการที่ (2.3.1) แทนในสมการที่ (2.3.4)

$$4i_3 - 3 - 8i_2 = 0$$

$$i_3 = \frac{3 + 8i_2}{4} \qquad (2.3.5)$$

แทนสมการที่ (2.3.3) และ (2.3.5) ในสมการที่ (2.3.2)

$$\frac{5 - 8i_2}{2} = i_2 + \frac{3 + 8i_2}{4}$$

$$10 - 16i_2 = 4i_2 + 3 + 8i_2$$

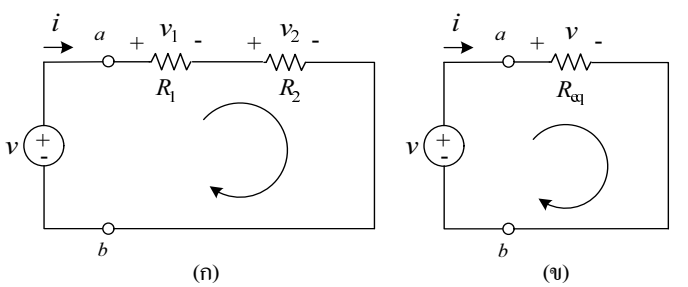
ดังนั้นจะได้ $i_2 = 0.25$ A นำไปคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันโดยใช้สมการที่ (2.3.1) ถึง (2.3.5) ได้ดังนี้

$$v_1 = 3\text{ V}, v_2 = 2\text{ V}, v_3 = 5\text{ V}, i_1 = 1.5\text{ A}, i_2 = 0.25\text{ A}\text{ และ } i_3 = 1.25\text{ A}$$

2.5 ตัวต้านทานต่อแบบอนุกรมและการแบ่งแรงดัน

การเชื่อมต่อกันของตัวต้านทานนั้นมีหลายลักษณะ ลักษณะที่หนึ่งคือการต่อแบบอนุกรม การต่อในลักษณะนี้มีข้อกำหนดว่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์แต่ละตัวต้องเป็นกระแสตัวเดียวกัน ดังตัวอย่างพิจารณาวงจรที่ 2.14 (ก) จะเห็นว่าตัวต้านทานสองตัวต่อกันแบบอนุกรมเพราะว่ามีกระแส i ที่ไหลผ่านเป็นตัวเดียวกัน จากกฎของโอห์มจะได้

$$v_1 = iR_1, \qquad v_2 = iR_2 \qquad (2.22)$$



รูปที่ 2.14 วงจรอนุกรม (ก) วงจรเริ่มต้น และ (ข) วงจรสมมูลย์

ใช้ KVL วิเคราะห์โดยกำหนดให้ลูปมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา

$$-v + v_1 + v_2 = 0 \tag{2.23}$$

จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะได้

$$v = v_1 + v_2 = i(R_1 + R_2) \tag{2.24}$$

หรือ

$$i = \frac{v}{R_1 + R_2} \tag{2.25}$$

สมการที่ (2.24) สามารถเขียนใหม่ได้

$$v = iR_{eq} \tag{2.26}$$

ดังนั้นตัวต้านทานสองตัวสามารถถูกแทนที่ด้วยตัวต้านทานรวม R_{eq} รูปที่ 2.14 (ก) สามารถแสดงแทนได้ด้วยวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.14 (ข)

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \tag{2.27}$$

> ความต้านทานรวมของตัวต้านทานที่ต่อแบบอนุกรม
> เท่ากับผลรวมของความต้านทานแต่ละตัวรวมกัน

สำหรับตัวต้านทานจำนวน N ตัวที่ต่อแบบอนุกรม

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots + R_N = \sum_{n=1}^{N} R_n \tag{2.28}$$

เพื่อที่จะทำการหาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวในรูปที่ 2.14 (ก) แทนสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v, \qquad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \tag{2.29}$$

แหล่งจ่ายแรงดันจะถูกแบ่งออกตามจำนวนของตัวต้านทาน โดยที่แรงดันตกคร่อมแต่ละตัวนั้นจะสัมพันธ์กับความต้านทานของตัวมัน เรียกกฎนี้ว่า กฎการแบ่งแรงดันและวงจรในรูปที่ 2.14 (ก) เรียกว่าวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider circuit) ถ้าแรงดันถูกแบ่งออกเป็น N ตัว โดยที่ตัวต้านทานต่อกันแบบอนุกรม เราจะได้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานลำดับที่ n ดังนี้

$$v_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \ldots + R_n} v \tag{2.30}$$

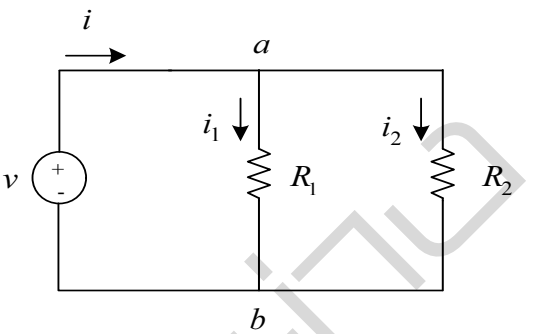
2.6 ตัวต้านทานต่อแบบขนานและการแบ่งกระแส

พิจารณารูปที่ 2.15 ตัวต้านทานสองตัวต่อกันแบบขนาน ซึ่งจะเห็นว่าทั้งสองมีแรงดันตกคร่อมเท่ากัน ดังนั้นจากกฎของโอห์มจะได้

$$v = i_1 R_1 = i_2 R_2$$

หรือ

$$i_1 = \frac{v}{R_1}, \qquad i_2 = \frac{v}{R_2} \tag{2.31}$$



รูปที่ 2.15 วงจรขนาน

ณ โนด a ใช้ KCL จะได้กระแสรวม

$$i = i_1 + i_2 \tag{2.32}$$

แทนสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.32)

$$i = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} = v\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{v}{R_{eq}} \tag{2.33}$$

R_{eq} คือความต้านทานรวมของตัวต้านทานที่ต่อขนาน

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{2.34}$$

หรือ

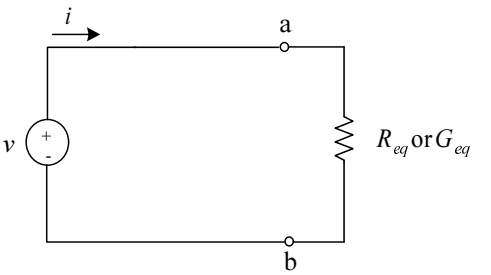
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{2.35}$$

ความต้านทานรวมของตัวต้านทานสองตัวที่ต่อขนานกันมีค่าเท่ากับผลคูณและหารด้วยผลรวม

ในกรณีตัวต้านทานต่อขนานกันจำนวน N ตัว ดังนั้นจากสมการที่ (2.34) จะได้

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_N} \tag{2.36}$$



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลย์ของวงจรในรูปที่ 2.15

วงจรรูปที่ 2.15 สามารถถูกแทนได้ด้วยวงจรในรูปที่ 2.16 จากกฎของโอห์ม

$$v = iR_{eq} = \frac{iR_1R_2}{R_1 + R_2} \tag{2.37}$$

ดังนั้นเราสามารถหากระแส i_1 และ i_2 ได้โดยแทนสมการที่ (2.37) ลงในสมการที่ (2.31)

$$i_1 = \frac{R_2 i}{R_1 + R_2}, \quad i_2 = \frac{R_1 i}{R_1 + R_2} \tag{2.38}$$

สมการที่ (2.38) เรียกว่ากฎการแบ่งกระแส และวงจรในรูปที่ 2.15 เรียกว่าวงจรแบ่งกระแส (Current divider circuit)

ในการคำนวณสำหรับวงจรขนานนั้นการใช้ความนำจะสะดวกกว่าการใช้ความต้านทาน จากสมการที่ (2.36) ความนำรวมสำหรับตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน N ตัว

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + ... + G_N \tag{2.39}$$

ความนำรวมของตัวต้านทานที่ต่อขนานกันมีค่าเท่ากับผลรวมของความนำแต่ละตัวรวมกัน

เราสามารถหาค่ากระแส i_1 และ i_2 ได้จากความนำ โดยใช้ R_1R_2 หารทั้งเศษและส่วนของสมการที่ (2.38) จะได้

$$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i, \quad i_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i \tag{2.40}$$

สมมุติมีตัวนำต่อขนานกัน N ตัว เราสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวนำแต่ละตัวได้

$$i_n = \frac{G_n}{G_1 + G_2 + ... + G_N} i \tag{2.41}$$

หมวดฟิสิกส์ประยุกต์

นายอภินันท์ อุรโสภณ

การศึกษา

- 2529 – 2532 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น (ปวช.)
  วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี สาขาอิเล็กทรอนิกส์
- 2534 – 2536 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)
  วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี สาขาอิเล็กทรอนิกส์
- 2536 – 2538 ระดับปริญญาตรีอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต (อสบ.)
  สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
- 2544 – 2546 ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วศม.)
  สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 2546 – 2549 ปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตร์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปรด.)
  สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ทุนการศึกษา

- 2546 – 2549 โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 6
  จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2547 นักศึกษาวิจัย (โดยทุน คปก.) ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยวิคเตอเรีย
  ประเทศแคนาดา ระหว่างวันที่ 9 มิถุนายน 2547 – 30 พฤศจิกายน 2547

การทำงาน

- 2542 –2543 อาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคอำนาจเจริญ อ. เมือง จ. อำนาจเจริญ
- 2550 อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต. แสนสุข
  อ. เมือง จ. ชลบุรี
- ธันวาคม 2550 ถึง ปัจจุบัน อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ. กันทรวิชัย
  จ. มหาสารคาม เบอร์โทร: 043-754321 ต่อ 3075 Email: aurasopon@yahoo.com

วงจรไฟฟ้า Electric Circuits

ISBN 978-616-511-230-7

9 786165 112307

ดวงกมลพับลิชชิ่ง
นำเสนอหนังสือดี มีคุณค่า