



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House

การวิเคราะห์ วงจรไฟฟ้า 1

Electrical Circuit Analysis I

พิมพ์ครั้งที่ 3

นิพัทธ์ จันทรมินทร์



การวิเคราะห์ วงจรไฟฟ้า 1

Electrical Circuit Analysis I

พิมพ์ครั้งที่ 3

นิพัทธ์ จันทรนิบตร์



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

Naresuan University Publishing House

www.nupress.grad.nu.ac.th



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร Naresuan University Publishing House

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 อาคารมหาธรรมราชา ชั้น 1 มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร. 0 5596 8833-8836 E-mail : nuph@nu.ac.th

www.nupress.grad.nu.ac.th สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร @nupress

สงวนลิขสิทธิ์ ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร ห้ามทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ต่อสาธารณชนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร เท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

นิพัทธ์ จันทรมินทร์.

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1= Electrical Circuit Analysis I.-พิมพ์ครั้งที่ 3.- พิษณุโลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566
424 หน้า.

1. วงจรไฟฟ้า. 2. การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.3192

ISBN 978-616-426-162-4

ISBN (e-book) 978-616-426-108-2

สพน. 50

ราคา 350 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 | พิมพ์ครั้งที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 | พิมพ์ครั้งที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2566

จัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

วางจำหน่ายที่

1. ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0 2218 9812
2. ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0 2579 0113
3. ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ถนนพระจันทร์ แขวงพระบรมมหาราชวัง เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200 โทร. 0 2613 3899
4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร อาคารมหาธรรมราชา จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร. 0 5596 8833-8836

ประธานกองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.ครองกาญจน์ ชูทิพย์ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิงการ พรหมมา • รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แยมแมน • รองศาสตราจารย์สุทัศน์ เขียววัฒนา •
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ สมกุล • รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี • รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสุธาพิทย์ พงษ์เจริญ •
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.กรรณก อิงคินันท์ • รองศาสตราจารย์ ดร.นิหระ กิจธิระวุฒิวงศ์ • รองศาสตราจารย์ ดร.สุทิสสา ถาน้อย •
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ชาญวิชัย • รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ แก้วอุไร • รองศาสตราจารย์ นาวาโท ดร.วัฒนชัย หนั่นน้อย •
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพล พุทธิรักษา • รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ กิจสนาโยธิน • ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุวรงค์ จันทรวิจิตร •
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรรยาธิ์ สุวพันธ์ • พัชรีย์ ท้วมใจดี • นวพรรณ ดันติผลาผล • สรญา แสงเย็นพันธ์

ประสานงาน

ภาคีณี เทติสิทธิกุล

ฝ่ายขาย/การเงิน

พิมพ์การณณ์ ดวงสาโรจน์ • วสันต์ มาสวัสดิ์

ออกแบบปก

สรญา แสงเย็นพันธ์

ออกแบบรูปเล่ม

สรญา จันทา

พิมพ์ที่

บริษัท กู๊ดเอด พรินท์ติ้ง แอนด์ แพคเกจจิ้ง กรุ๊ป จำกัด 6/1 นิคมอุตสาหกรรมบางชัน ซอยเสรีไทย 58 แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
โทร. 0 2136 7042



สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์
และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย
<https://pubat.or.th>



พิมพ์บน
กระดาษคุณภาพ เพื่อผลงานคุณภาพ
กระดาษจากโรงงานรีไซเคิล



กรณีต้องการสั่งซื้อหนังสือปริมาณมาก หรือเข้าชั้นเรียนติดต่อได้ที่ฝ่ายจัดจำหน่ายสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
โทร. 0 5596 8836 Email : nuph@nu.ac.th



คำนำ

ตำราเล่มนี้เรียบเรียงขึ้นมาให้ครอบคลุมเนื้อหาสาระของวิชา 303211 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1 (Electrical Circuit Analysis I) สำหรับใช้ในการเรียนการสอนนิสิตระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 2 ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เนื้อหาในตำราเล่มนี้อธิบายเริ่มจากประเด็นพื้นฐานเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า เพื่อให้ให้นิสิตมีความเข้าใจในเนื้อหาและสามารถนำไปใช้ต่อยอดในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าต่อไป โดยแบ่งออกเป็น 9 บท

ในบทที่ 1 ได้อธิบายส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้า สัญลักษณ์ขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า เพื่อเขียนแผนภาพวงจร ระบบหน่วยเอสไอ รวมทั้งตัวต้านทานและกฎของโอห์ม ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า หลังจากนั้นในบทที่ 2 ได้อธิบายการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน การแบ่งแรงดันในวงจรอนุกรมและการแบ่งกระแสในวงจรขนาน รวมทั้งการประยุกต์ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ในวิธีแรงดันโนดและวิธีกระแสเมชเพื่อคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร (ค่ากระแสและแรงดัน) ในขณะที่หลักการอื่นที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้านอกเหนือจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ถูกอธิบายในบทที่ 3 อันได้แก่ การแปลงแหล่งกำเนิด การทับซ้อน รวมทั้งทฤษฎีบทของเทเวนินและนอร์ตันและการประยุกต์ใช้สำหรับการถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งเพิ่มความหลากหลายในการเลือกใช้วิธีคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร อย่างไรก็ตามในวงจรไฟฟ้า นอกจากตัวต้านทานแล้วอาจมีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำด้วย ดังนั้นในบทที่ 4 จึงอธิบายคุณลักษณะของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ความต่อเนื่องของค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและความต่อเนื่องของค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ จากนั้นในบทที่ 5 จึงอธิบายหลักการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่มีตัวเก็บประจุ 1 ตัวหรือมีตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัวต่อร่วมอยู่กับตัวต้านทานซึ่งเรียกว่าวงจรอันดับหนึ่ง ชนิดและคุณลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในวงจร รวมทั้งแสดงให้เห็นประโยชน์ของการประยุกต์ใช้ผลการแปลงลาปลาซเพื่อหาผลตอบสนองในวงจร และในบทที่ 6 อธิบายหลักการวิเคราะห์วงจรอันดับสอง ซึ่งมักประกอบด้วยตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำรวมกัน 2 ตัวต่อร่วมอยู่กับตัวต้านทาน การหาสมการลักษณะเฉพาะ และแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ผลการแปลงลาปลาซเพื่อหาผลตอบสนองในวงจร ตามด้วยบทที่ 7 ที่เน้นการหาผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวของวงจรที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยใช้หลักการของเฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์ซึ่งลดความยุ่งยากในการหาคำตอบได้อย่าง

มากโดยเฉพาะในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำหลายตัว นอกจากนี้ยังนำหลักการของเฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์มาใช้งานอย่างต่อเนื่องในบทที่ 8 เพื่อคำนวณค่ากำลังในวงจรที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยเป็นการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเฟสเดียวซึ่งนำไปสู่วิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิดในสถานะอยู่ตัว และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ตลอดจนในบทที่ 9 ที่อธิบายคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีการเชื่อมต่อวงจรทั้งแบบสตาร์และแบบเดลตา และการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลโดยใช้วงจรสมมูลเฟสเดียวรวมทั้งวิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิด

ในเนื้อหาของแต่ละบทมีตัวอย่างการคำนวณพร้อมคำอธิบายและการวิเคราะห์วงจรเพื่อช่วยให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ตอนท้ายของแต่ละบทมีสรุปสาระสำคัญของเนื้อหาและมีแบบฝึกหัดท้ายบทเพื่อให้ผู้อ่านได้ประมวลความรู้ความเข้าใจรวมทั้งฝึกฝนการแก้ปัญหาโจทย์เพื่อให้เกิดทักษะในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ผู้เขียนหวังว่าตำราเล่มนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าให้กับนิสิตที่เรียนในรายวิชาดังกล่าวรวมทั้งบุคคลอื่นที่สนใจซึ่งสามารถอ่านและทำความเข้าใจในสาระของตำราเล่มนี้ได้ด้วยตนเอง

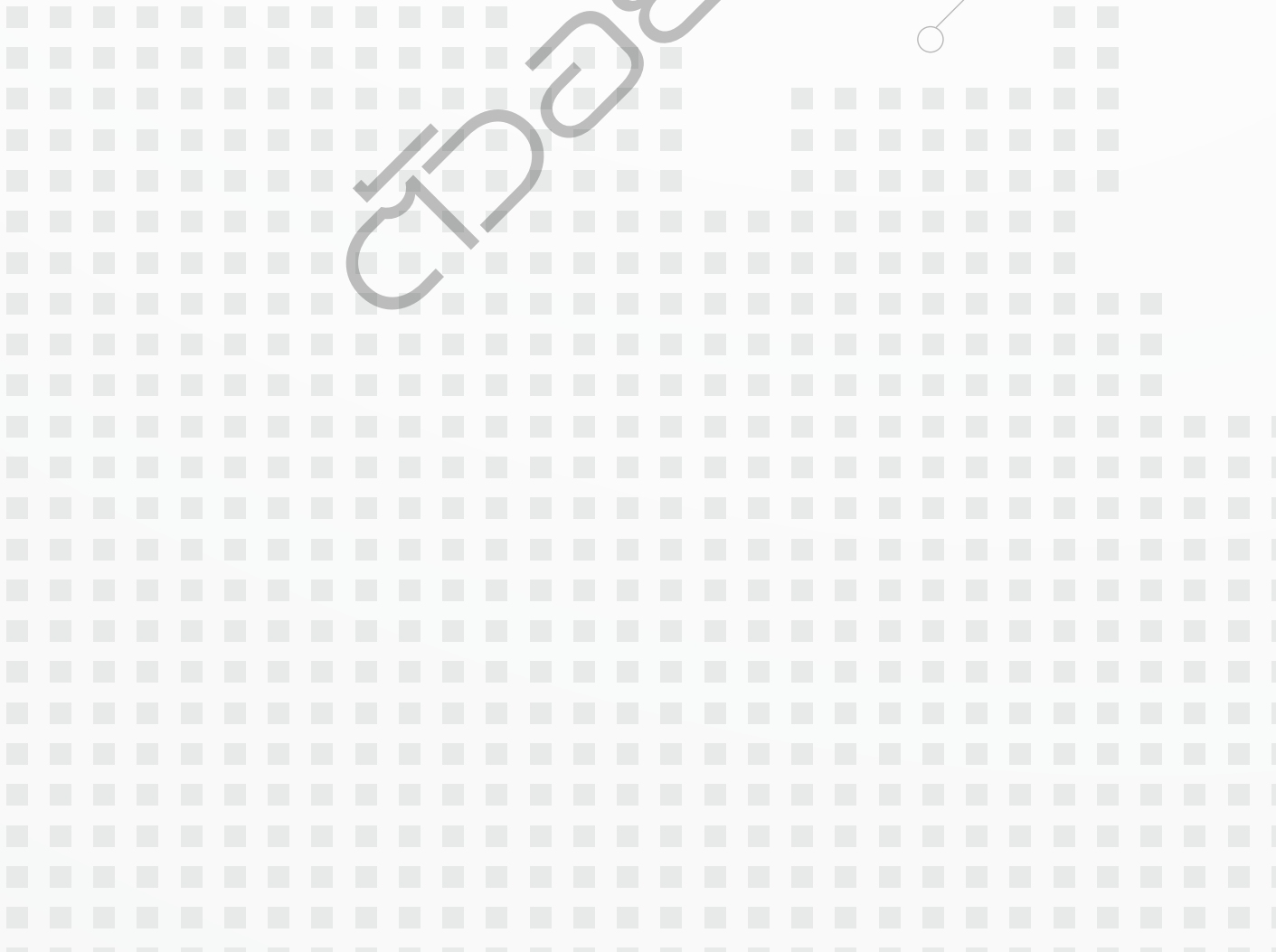
นิพัทธ์ จันทรินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร



สารบัญ



บทที่ 1 องค์ประกอบและปริมาณในวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit Elements and Quantities).....	1
1.1 องค์ประกอบวงจร.....	1
1.2 ประจุและกระแส.....	8
1.3 แรงดัน พลังงาน และกำลัง.....	11
1.4 ตัวต้านทานและกฎของโอห์ม.....	15
1.5 แหล่งกำเนิด.....	21
1.6 สวิตช์.....	23
1.7 แหล่งกำเนิดสัญญาณขั้น.....	27
1.8 สรุป.....	31
1.9 แบบฝึกหัด.....	32
บทที่ 2 การวิเคราะห์วงจรตัวต้านทาน (Analysis of Resistive Circuits)	35
2.1 กฎกระแสของเคอร์ชอฟ.....	35
2.2 กฎแรงดันของเคอร์ชอฟ.....	39
2.3 การต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม.....	43
2.4 การต่อตัวต้านทานแบบขนาน.....	49
2.5 การต่อตัวต้านทานแบบผสมระหว่างอนุกรมและขนาน.....	57
2.6 ความต้านทานสมมูลของการต่อแบบเดลตาและแบบสตาร์.....	59
2.7 วิธีแรงดันโนด.....	65
2.8 วิธีกระแสเมช.....	72
2.9 สรุป.....	80
2.10 แบบฝึกหัด.....	82
บทที่ 3 ทฤษฎีบทวงจรไฟฟ้า (Circuit Theorems).....	91
3.1 การแปลงแหล่งกำเนิด.....	91
3.2 การทับซ้อน.....	99
3.3 ทฤษฎีบทของเทเวนิน.....	107
3.4 ทฤษฎีบทของนอร์ตัน.....	116
3.5 การถ่ายโอนกำลังสูงสุด.....	120
3.6 สรุป.....	125
3.7 แบบฝึกหัด.....	126

บทที่ 4 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitors and Inductors)	135
4.1 ตัวเก็บประจุและความจุ	135
4.2 การสะสมพลังงานในตัวเก็บประจุ	141
4.3 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมและแบบขนาน	143
4.4 ตัวเหนี่ยวนำและความเหนี่ยวนำ	150
4.5 การสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ	155
4.6 การต่อตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมและแบบขนาน	157
4.7 สถานะอยู่ตัวในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง	163
4.8 สรุป	169
4.9 แบบฝึกหัด	170
บทที่ 5 วงจรอันดับหนึ่ง (First-Order Circuits)	175
5.1 วงจร RC ที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	175
5.2 วงจร RC ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดอิสระ	178
5.3 ค่าคงตัวทางเวลา	180
5.4 วงจร RL ที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	183
5.5 วงจร RL ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดอิสระ	186
5.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณเข้าที่มีค่าคงที่	190
5.7 เงื่อนไขเริ่มต้นขององค์ประกอบสะสมพลังงาน	195
5.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณเข้าที่มีค่าไม่คงที่	208
5.9 ผลการแปลงลาปลาซ	211
5.10 สรุป	218
5.11 แบบฝึกหัด	219
บทที่ 6 วงจรอันดับสอง (Second-Order Circuits)	227
6.1 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง	227
6.2 ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง	230
6.3 ผลตอบสนองธรรมชาติ	232
6.4 ชนิดของผลตอบสนองธรรมชาติ	233
6.5 ผลตอบสนองแบบบังคับ	245
6.6 การหาผลตอบสนองบริบูรณ์	249
6.7 ผลการแปลงลาปลาซ	262
6.8 สรุป	266
6.9 แบบฝึกหัด	267

บทที่ 7 การวิเคราะห์สถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Steady-State Analysis)	275
7.1 คุณสมบัติของสัญญาณรูปไซน์และเฟสเซอร์	275
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสเซอร์กับกระแสเฟสเซอร์	279
7.3 อิมพีแดนซ์	284
7.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์และการต่ออิมพีแดนซ์	289
7.5 วิธีแรงดันโนดและวิธีกระแสเมช	300
7.6 การแปลงแหล่งกำเนิดและการทับซ้อน	304
7.7 ทฤษฎีบทของเทเวนินและทฤษฎีบทของนอร์ตัน	313
7.8 แผนภาพเฟสเซอร์	318
7.9 สรุป	322
7.10 แบบฝึกหัด	322
บทที่ 8 กำลังในสถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Steady-State Power)	329
8.1 กำลังขณะหนึ่ง	329
8.2 กำลังเฉลี่ย	333
8.3 ค่าอาร์เอ็มเอสของสัญญาณที่มีฟังก์ชันเป็นคาบ	335
8.4 กำลังเชิงซ้อน	338
8.5 สามเหลี่ยมแรงดันและสามเหลี่ยมกำลัง	346
8.6 ตัวประกอบกำลัง	349
8.7 สรุป	357
8.8 แบบฝึกหัด	358
บทที่ 9 วงจรสามเฟส (Three-Phase Circuits)	365
9.1 วงจรสามเฟสสมดุล	365
9.2 วงจรสามเฟสแบบสตาร์และแบบเดลตา	370
9.3 ความสัมพันธ์พื้นฐานในวงจรสามเฟส	372
9.4 แรงดันสายและแรงดันเฟสของวงจรสตาร์	375
9.5 กระแสในวงจรโหลดแบบสตาร์และแบบเดลตา	379
9.6 วงจรสมมูลเฟสเดียว	385
9.7 กำลังในวงจรโหลดสามเฟสสมดุล	392
9.8 สรุป	402
9.9 แบบฝึกหัด	403
บรรณานุกรม	407
ดัชนี	409



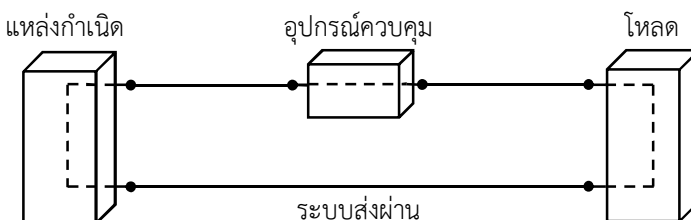
องค์ประกอบและปริมาณ ในวงจรไฟฟ้า

(Electrical Circuit Elements and Quantities)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า ผู้ที่เริ่มศึกษาวงจรไฟฟ้าควรทราบ
นิยามของวงจรไฟฟ้า ความหมายของการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า
และหน่วยที่ใช้เป็นมาตรฐานในการวัดค่าปริมาณดังกล่าว การเชื่อมกันขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าทำให้
สามารถหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าในวงจรได้โดยแก้สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของปริมาณที่วัดค่าได้
เหล่านั้น ดังนั้นความเข้าใจในการทำงานขององค์ประกอบแต่ละประเภทซึ่งทำให้ทราบเงื่อนไขของปริมาณ
ทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

1.1 องค์ประกอบวงจร

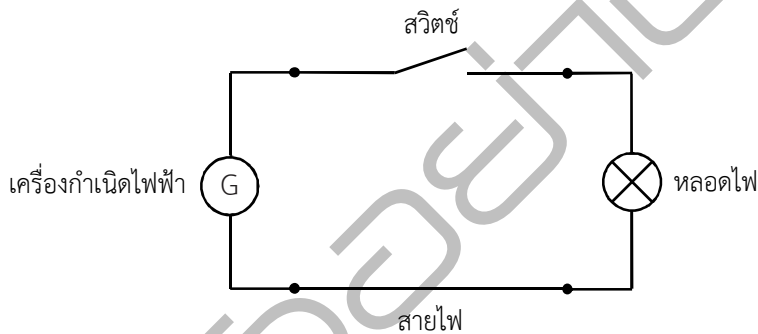
ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนดังรูปที่ 1.1 ส่วนที่ 1 คือแหล่งกำเนิด (Source)
เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซลล์สุริยะ แบตเตอรี่ มีหน้าที่ผลิตและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่ 2 คือ
โหลด (Load) ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการใช้พลังงานที่ได้รับจากแหล่งกำเนิด อุปกรณ์ส่วนใหญ่ภายในบ้านเรือน
จัดเป็นโหลด เช่น หลอดไฟ พัดลม โทรทัศน์ ส่วนที่ 3 คือระบบส่งผ่าน (Transmission system) ซึ่งมัก
ประกอบด้วยสายไฟ มีหน้าที่นำพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด และส่วนที่ 4 คืออุปกรณ์ควบคุม มี
หน้าที่ยอมให้พลังงานไหลผ่านหรือยับยั้งการไหลของพลังงาน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)
สวิตช์ (Switch) ทั้งนี้ เราสามารถอธิบายส่วนประกอบของระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองอุดมคติที่เรียกว่า
“องค์ประกอบวงจร” (Circuit element)



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้า

การเชื่อมต่อขององค์ประกอบอย่างต่อเนื่องกันเป็นเส้นทางปิดทำให้เกิด “วงจรไฟฟ้า” (Electrical circuit) ซึ่งในตำราเล่มนี้ใช้วงจรไฟฟ้าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการทำงานของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริง หลังจากที่ยังวงจรได้รับการกระตุ้น (Excitation) หรือสัญญาณเข้า (Input) จากแหล่งกำเนิดแล้ว วงจรจะสร้างผลตอบสนอง (Response) หรือสัญญาณออก (Output) ดังนั้นการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าจึงเป็นการหาผลตอบสนองเมื่อวงจรได้รับการกระตุ้น

พิจารณาระบบไฟฟ้าอย่างง่าย เช่น ระบบไฟส่องสว่างที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายพลังงานให้กับหลอดไฟโดยมีสวิตช์เพื่อเปิดและปิดไฟ รายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบมักถูกแทนด้วยสัญลักษณ์เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจมากขึ้นและวาดเป็นแผนภาพวงจรไฟฟ้า (Electrical circuit diagram) ได้ดังรูปที่ 1.2 เพื่อแสดงการไหลของพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังหลอด โดยนิยมแสดงการไหลของพลังงานจากซ้ายไปขวา ดังนั้นจึงวาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ด้านซ้ายและวาดหลอดไฟไว้ด้านขวาของวงจรโดยมีสวิตช์กั้นอยู่ระหว่างกลาง



รูปที่ 1.2 แผนภาพวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

หากพิจารณาความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เราอาจจำแนกองค์ประกอบวงจรได้เป็น 2 ประเภทคือ องค์ประกอบไวงานหรือองค์ประกอบแอกทีฟ (Active element) กับองค์ประกอบเฉื่อยงานหรือองค์ประกอบพาสซีฟ (Passive element) ทั้งนี้ องค์ประกอบไวงานสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ แหล่งกำเนิดในวงจรไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซลล์สุริยะ แบตเตอรี่ จัดเป็นองค์ประกอบไวงาน ในทางกลับกัน องค์ประกอบเฉื่อยงานไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เอง แต่ดูดกลืนพลังงานที่ได้รับจากวงจร โหลดในวงจรไฟฟ้า เช่น ตัวต้านทาน (Resistor) จัดเป็นองค์ประกอบเฉื่อยงาน อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบเฉื่อยงานบางชนิดสามารถสะสมพลังงานที่ได้รับจากวงจรและส่งจ่ายพลังงานดังกล่าวออกมาในภายหลังได้ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

นอกจากนี้ องค์ประกอบวงจรอาจจำแนกได้เป็นองค์ประกอบเชิงเส้น (Linear element) และ องค์ประกอบไม่เชิงเส้น (Non-linear element) เราจะสรุปว่าองค์ประกอบใดเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นได้ ก็ต่อเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นและผลตอบสนองขององค์ประกอบนั้นมีทั้งสมบัติการทับซ้อน (Superposition) และสมบัติเอกพันธ์ (Homogeneity) สมมติว่าปริมาณที่ใช้กระตุ้นองค์ประกอบคือ x และ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นคือ y การพิสูจน์สมบัติการทับซ้อนสามารถทำได้โดยกระตุ้นองค์ประกอบด้วย x_1 ซึ่งทำให้เกิดผลตอบสนองเป็น y_1 จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นการกระตุ้นด้วย x_2 ซึ่งทำให้เกิดผลตอบสนองเป็น y_2 แล้วจึงเปลี่ยนเป็นการกระตุ้นด้วยปริมาณที่เท่ากับ $x_1 + x_2$ ถ้าผลตอบสนองที่ได้มีค่าเท่ากับ $y_1 + y_2$ แล้วเราจึงสรุปได้ว่าองค์ประกอบนั้นมีสมบัติการทับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์สมบัติเอกพันธ์สามารถทำได้โดยกระตุ้นด้วย ปริมาณที่เท่ากับ $k \cdot x_1$ โดยที่ k คือตัวคูณที่มีค่าคงที่ ถ้าผลตอบสนองที่ได้มีค่าเท่ากับ $k \cdot y_1$ แล้วเราจึงสรุปได้ว่า องค์ประกอบดังกล่าวมีสมบัติเอกพันธ์ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบใดที่ขาดสมบัติการทับซ้อนหรือขาดสมบัติ เอกพันธ์ก็ถือว่าเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์วงจรที่มีองค์ประกอบไม่เชิงเส้นรวมอยู่ด้วยจะมีความยุ่งยากมากกว่าวงจรที่มีเพียงองค์ประกอบเชิงเส้นหรือวงจรที่มีทั้งสมบัติการทับซ้อนและสมบัติเอกพันธ์ ซึ่งเรียกว่า “วงจรเชิงเส้น” (Linear circuit)



ตัวอย่างที่ 1.1

กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นด้วยปริมาณ x กับผลตอบสนอง y ขององค์ประกอบ หนึ่งแสดงได้เป็น $y = a \cdot x$ โดยที่ a เป็นค่าคงตัว จงพิจารณาว่าองค์ประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบเชิงเส้น หรือไม่

วิธีทำ

เมื่อกระตุ้นด้วย x_1 จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_1 = a \cdot x_1$$

และเมื่อกระตุ้นด้วย x_2 จะเกิดผลตอบสนอง y_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_2 = a \cdot x_2$$

จะได้ว่า ผลบวกของผลตอบสนองทั้งสองมีค่าเท่ากับ

$$y_1 + y_2 = a \cdot x_1 + a \cdot x_2 = a \cdot (x_1 + x_2)$$

จากนั้นกระตุ้นด้วยปริมาณที่มีค่าเท่ากับ $x_1 + x_2$ จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_3 = a \cdot (x_1 + x_2)$$

ดังนั้นจะเห็นว่า

$$y_3 = y_1 + y_2$$

แสดงว่าองค์ประกอบนี้มีสมบัติการทับซ้อน

ถ้ากระตุ้นด้วยปริมาณที่มีค่าเท่ากับ $k \cdot x_1$ โดยที่ k เป็นตัวคูณที่มีค่าคงที่ แล้วผลตอบสนอง y_4 ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$y_4 = a \cdot (k \cdot x_1) = k \cdot (a \cdot x_1) = k \cdot y_1$$

แสดงว่าองค์ประกอบนี้มีสมบัติเอกพันธ์ จึงสรุปได้ว่าเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นเนื่องจากมีทั้งสมบัติการทับซ้อน และสมบัติเอกพันธ์ #



ตัวอย่างที่ 1.2

กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นด้วยปริมาณ x กับผลตอบสนอง y ขององค์ประกอบหนึ่งแสดงได้เป็น $y = m \cdot x + c$ โดยที่ m และ c เป็นค่าคงตัว จงพิจารณาว่าองค์ประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นหรือไม่

วิธีทำ

การกระตุ้นด้วย x_1 จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_1 = m \cdot x_1 + c$$

และกำหนดให้ผลตอบสนอง y_2 เกิดจากการกระตุ้นด้วย x_2 เราจะได้

$$y_2 = m \cdot x_2 + c$$

จะได้ว่า ผลบวกของผลตอบสนองทั้งสองมีค่าเท่ากับ

$$y_1 + y_2 = m \cdot (x_1 + x_2) + 2c$$

กำหนดให้ผลตอบสนอง y_3 เกิดจากการกระตุ้นด้วยปริมาณที่มีค่าเท่ากับ $x_1 + x_2$ และจะได้

$$y_3 = m \cdot (x_1 + x_2) + c$$

นั่นคือ

$$y_3 \neq y_1 + y_2$$

จึงสรุปได้ว่าเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น เพราะขาดสมบัติการทับซ้อน #



ตัวอย่างที่ 1.3

กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นด้วยปริมาณ x กับผลตอบสนอง y ขององค์ประกอบหนึ่งแสดงได้เป็น $y = dx/dt$ จงพิจารณาว่าองค์ประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นหรือไม่

วิธีทำ

เมื่อกระตุ้นด้วย x_1 จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_1 = \frac{dx_1}{dt}$$

และเมื่อกระตุ้นด้วย x_2 จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_2 = \frac{dx_2}{dt}$$

จะได้ว่า ผลบวกของผลตอบสนองทั้งสองมีค่าเท่ากับ

$$y_1 + y_2 = \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt}$$

จากนั้นกระตุ้นด้วยปริมาณที่มีค่าเท่ากับ $x_1 + x_2$ จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_3 = \frac{d}{dt}(x_1 + x_2) = \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt}$$

ดังนั้นจะเห็นว่า

$$y_3 = y_1 + y_2$$

แสดงว่าองค์ประกอบนี้มีสมบัติการทับซ้อน

เมื่อกระตุ้นด้วยปริมาณที่มีค่าเท่ากับ $k \cdot x_1$ โดยที่ k เป็นตัวคูณที่มีค่าคงที่ จะทำให้เกิดผลตอบสนอง y_4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$y_4 = \frac{d(kx_1)}{dt} = k \frac{dx_1}{dt} = k \cdot y_1$$

แสดงว่าองค์ประกอบนี้มีสมบัติเอกพันธ์ จึงสรุปได้ว่าเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นเนื่องจากมีทั้งสมบัติการทับซ้อนและสมบัติเอกพันธ์ #

1

2

3

4

5

6

7

8

9

ในการอธิบายวงจรและองค์ประกอบในวงจรให้ชัดเจนจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณเหล่านี้ต้องถูกนิยามอย่างรอบคอบโดยอาศัยระบบมาตรฐานของหน่วยที่สอดคล้องกัน ในปี ค.ศ.1960 หน่วยเอสไอ (International System of Units) ถูกกำหนดขึ้นอย่างเป็นทางการ และประเทศส่วนใหญ่นำมาใช้ในระบบการวัดที่ต้องตามกฎหมาย ตัวอย่างของหน่วยเอสไอแสดงในตารางที่ 1.1 หน่วยของความยาว มวล เวลา กระแส อุณหภูมิ ปริมาณสาร และความเข้มของการส่องสว่างเป็นหน่วยฐาน ในขณะที่หน่วยอื่นเป็นหน่วยอนุพัทธ์ เพราะเกิดจากผลคูณหรือผลหารของหน่วยฐานตามนิยามของปริมาณนั้น

ตารางที่ 1.1 หน่วยเอสไอ

ปริมาณ	หน่วยเอสไอ	
	ชื่อของหน่วย	สัญลักษณ์
ความยาว	เมตร (metre)	m
มวล	กิโลกรัม (kilogram)	kg
เวลา	วินาที (second)	s
กระแส	แอมแปร์ (ampere)	A
อุณหภูมิ	เคลวิน (kelvin)	K
ปริมาณสาร	โมล (mole)	mol
ความเข้มของการส่องสว่าง	แคนเดลา (candela)	cd
ประจุ	คูลอมบ์ (coulomb)	C
แรงดัน	โวลต์ (volt)	V
ความต้านทาน	โอห์ม (ohm)	Ω
ความนำ	ซีเมนส์ (siemens)	S
ความจุ	ฟารัด (farad)	F
ความเหนี่ยวนำ	เฮนรี (henry)	H
กำลัง	วัตต์ (watt)	W
งานหรือพลังงาน	จูล (joule)	J
เส้นแรงแม่เหล็ก	เวเบอร์ (weber)	Wb
ความถี่	เฮิร์ตซ์ (hertz)	Hz
แรง	นิวตัน (newton)	N

สัญลักษณ์ของหน่วยจะไม่มีจุดตามหลัง และไม่มีรูปพหุพจน์ ถ้าเป็นหน่วยที่ตั้งขึ้นจากชื่อคนจะเขียนด้วยอักษรตัวใหญ่ แต่ถ้าเป็นหน่วยที่ไม่ได้ตั้งขึ้นจากชื่อคนจะใช้อักษรตัวเล็ก หน่วยเอสไอสามารถใช้ร่วมกับ “ตัวคูณเติมข้างหน้า” (Prefix multiplier) ดังแสดงในตารางที่ 1.2 เพื่อแสดงหน่วยเอสไอให้ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงได้

ตารางที่ 1.2 ตัวคูณเติมข้างหน้า

คำเติมข้างหน้า	ศัพท์ไทย	สัญลักษณ์	ค่า
exa-	เอกซะ-	E	10^{18}
peta-	เพตะ-	P	10^{15}
tera-	เทระ-	T	10^{12}
giga-	จิกะ-	G	10^9
mega-	เมกะ-	M	10^6
kilo-	กิโล-	k	10^3
hecto-	เฮกโต-	h	10^2
deca-	เดคา-	da	10
deci-	เดซิ-	d	10^{-1}
centi-	เซนติ-	c	10^{-2}
milli-	มิลลิ-	m	10^{-3}
micro-	ไมโคร-	μ	10^{-6}
nano-	นาโน-	n	10^{-9}
pico-	พิโค-	p	10^{-12}
femto-	เฟมโต-	f	10^{-15}
atto-	อัตโต-	a	10^{-18}



ตัวอย่างที่ 1.4

จงแสดงระยะเวลา 0.15 ms ในหน่วยไมโครวินาที

วิธีทำ

เราสามารถแปลงระยะเวลาในหน่วยมิลลิวินาที (ms) ให้อยู่ในหน่วยไมโครวินาที (μs) โดยนำตัวคูณ μ มาคูณและหารกับหน่วย ms เพื่อให้ค่ายังคงเท่าเดิม จากนั้นจัดรูปของหน่วยเป็น μs โดยสลับตำแหน่งของ μ กับ m แล้วแทนค่าตัวคูณที่เหลือนอกจาก μs จะได้ดังนี้

$$0.15 \text{ ms} = 0.15 \frac{\mu}{\mu} \text{ ms} = 0.15 \frac{\text{m}}{\mu} \mu\text{s} = 0.15 \times \frac{10^{-3}}{10^{-6}} \mu\text{s} = 150 \mu\text{s} \quad \#$$



ตัวอย่างที่ 1.5

จงเรียงลำดับค่ากระแส 0.05 A, 10 mA และ 700 μA จากต่ำไปสูง

วิธีทำ

ในการเปรียบเทียบค่ากระแสทั้งสาม เราควรแสดงแต่ละค่าให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน โดยในที่นี้เลือกหน่วยมิลลิแอมแปร์ (mA) จะได้ว่า

$$0.05 \text{ A} = 0.05 \frac{\text{m}}{\text{m}} \text{ A} = 0.05 \frac{1}{\text{m}} \text{ mA} = 0.05 \times \frac{1}{10^{-3}} \text{ mA} = 50 \text{ mA}$$

$$700 \mu\text{A} = 700 \frac{\text{m}}{\text{m}} \mu\text{A} = 700 \frac{\mu}{\text{m}} \text{ mA} = 700 \times \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \text{ mA} = 0.7 \text{ mA}$$

ดังนั้น หากเรียงค่ากระแสจากต่ำไปสูง จะได้ว่า $700 \mu\text{A} < 10 \text{ mA} < 0.05 \text{ A}$ #

1.2 ประจุและกระแส

เราให้ความสำคัญกับการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge) ในวงจรไฟฟ้าเพราะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงาน ประจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (coulomb, C) โดยสามารถอธิบายในรูปของประจุของอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมในวัสดุทั้งหลาย เราจะได้ว่า อิเล็กตรอน 1 ตัวมีประจุ -1.6×10^{-19} คูลอมบ์ ดังนั้น -1 คูลอมบ์คือประจุของอิเล็กตรอนจำนวนประมาณ 6.3×10^{23} ตัว ประจุถูกเคลื่อนย้ายตามเส้นทางที่กำหนดในวงจรไฟฟ้าจึงทำให้เกิดกระแสซึ่งคำนวณค่าได้จากอัตราการไหลของประจุผ่านส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

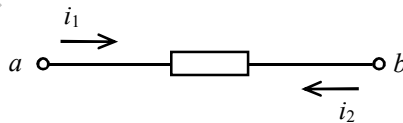
โดยที่ i คือกระแส ซึ่งมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (ampere, A), q คือประจุ และ t คือเวลา ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (second, s) สำหรับกรณีที่ทราบค่ากระแส i และต้องการหาประจุ เราสามารถคำนวณได้จาก

$$q = \int_{-\infty}^t i \, dt = \int_0^t i \, dt + q(0) \quad (1.2)$$

โดยที่ $q(0)$ คือประจุที่เวลา $t = 0$

ประจุสามารถเคลื่อนที่ได้โดยสะดวกภายในวัสดุที่เป็นตัวนำ (Conductor) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโลหะ เช่น ทองแดง (Copper) อะลูมิเนียม (Aluminium) และเงิน (Silver) วัสดุเหล่านี้จึงสามารถนำกระแสได้ดี ซึ่งตรงกันข้ามกับวัสดุที่เป็นฉนวน (Insulator) เช่น พอร์ซเลน (Porcelain) ไนลอน (Nylon) และยาง (Rubber) ที่มีอิเล็กตรอนยึดเกาะกันด้วยพันธะที่แน่นหนา ส่งผลให้การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเป็นไปด้วยความยากลำบาก แม้ว่าในความเป็นจริงเราทราบว่า กระแสในตัวนำที่เป็นโลหะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ แต่เรานิยมกำหนดให้การไหลของกระแสเป็นการเคลื่อนที่ของประจุบวก จึงอธิบายได้ว่า กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งแนวคิดดังกล่าวถูกริเริ่มโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin)

การเขียนสัญลักษณ์เพื่ออธิบายกระแสที่ผ่านองค์ประกอบใด ๆ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ค่าของกระแสและทิศทางการไหลของกระแส โดยที่ค่าของกระแสอาจอยู่ในรูปของตัวเลขหรือชื่อตัวแปร และอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ในขณะที่ทิศทางการไหลของกระแสนิยมแสดงด้วยลูกศร การเขียนสัญลักษณ์ของกระแสที่ผ่านองค์ประกอบหนึ่งในวงจรแสดงดังรูปที่ 1.3 ซึ่งอาจเขียนได้ 2 แบบคือ กระแส i_1 ที่ไหลจากขั้วต่อ a ไปยังขั้วต่อ b และกระแส i_2 ที่ไหลจากขั้วต่อ b ไปยังขั้วต่อ a อย่างไรก็ตาม i_1 และ i_2 มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางการไหลตรงกันข้าม นั่นคือ $i_1 = -i_2$



รูปที่ 1.3 กระแสไหลผ่านองค์ประกอบในวงจร



ตัวอย่างที่ 1.6

กำหนดให้ประจุที่ผ่านองค์ประกอบหนึ่งในวงจรมีค่าเท่ากับ $q = 3t$ C จงคำนวณค่ากระแสที่ผ่านองค์ประกอบนี้

วิธีทำ

ค่ากระแสที่ผ่านองค์ประกอบหาได้ดังนี้

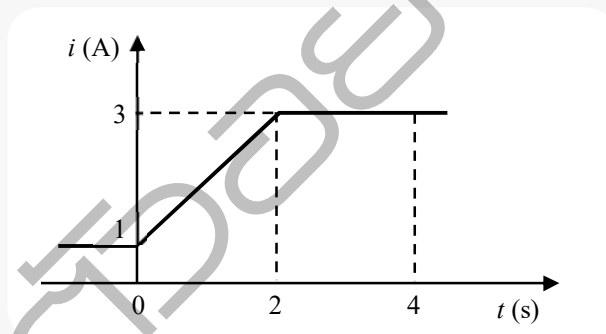
$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(3t)}{dt} = 3 \text{ A}$$

#



ตัวอย่างที่ 1.7

กำหนดให้กระแสที่ผ่านองค์ประกอบหนึ่งในวงจรมีค่าดังรูปที่ 1.4 จงหาประจุที่ผ่านองค์ประกอบนี้ในช่วงเวลาตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = 4$ s



รูปที่ 1.4 กราฟกระแสสำหรับตัวอย่างที่ 1.7

วิธีทำ

จากรูปที่ 1.4 เราสามารถเขียนอธิบายค่ากระแสที่ผ่านองค์ประกอบได้ดังนี้

$$i = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ t+1, & 0 < t \leq 2 \\ 3, & t > 2 \end{cases}$$

และคำนวณประจุที่ผ่านองค์ประกอบในช่วงเวลาตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = 4$ s ได้จาก

$$\begin{aligned} q &= \int_0^4 i \, dt = \int_0^2 (t+1) \, dt + \int_2^4 3 \, dt \\ &= \left[\frac{t^2}{2} + t \right]_{t=0}^{t=2} + 3t \Big|_{t=2}^{t=4} = 10 \text{ C} \end{aligned}$$

#

นอกจากนี้ เราอาจหาประจุได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟกระแสในช่วงเวลาที่กำหนด นั่นคือ

$$q = \text{พื้นที่ใต้กราฟในช่วง } 0 < t \leq 2 + \text{พื้นที่ใต้กราฟในช่วง } 2 < t \leq 4$$

$$= \left(\frac{1}{2}(1+3) \times 2 \right) + (2 \times 3) = 10 \text{ C} \quad \#$$

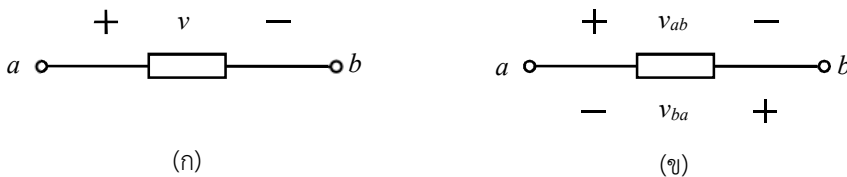
1.3 แรงดัน พลังงาน และกำลัง

การไหลของกระแสจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรนั้น นอกจากต้องอาศัยเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างสองจุดนั้นเพื่อให้ประจุสามารถเดินทางผ่านได้แล้ว ยังต้องอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) เพื่อเคลื่อนย้ายประจุระหว่างสองจุดนั้น แสดงว่าต้องเกิดงานจากการเคลื่อนย้ายประจุเหล่านั้น พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุบวก 1 C ผ่านองค์ประกอบใด ๆ ถูกนิยามให้เป็น “แรงดัน” (Voltage) คร่อมองค์ประกอบนั้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1.3)$$

โดยที่ v คือแรงดันคร่อมองค์ประกอบ ซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์ (volt, V), w คือพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) และ q คือประจุ ซึ่งมีหน่วยเป็นคูลอมบ์

การเขียนสัญลักษณ์ของแรงดัน ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ค่าของแรงดัน และขั้ว (Polarity) ของแรงดัน ค่าของแรงดันอาจอยู่ในรูปของตัวเลขหรือชื่อตัวแปร และอาจมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ ในการเขียนขั้วของแรงดันคร่อมองค์ประกอบหนึ่ง ๆ จะใช้เครื่องหมาย + และ - ระบุขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ เพื่อแสดงการเปรียบเทียบที่ขั้วต่อทั้งสองขององค์ประกอบนั้น โดยกำหนดให้ขั้วต่อที่มีศักย์สูงกว่าเป็นขั้วบวก และให้ขั้วต่อที่มีศักย์ต่ำกว่าเป็นขั้วลบ ด้วยเหตุผลข้างต้น เราจึงอาจเรียกแรงดันว่า “ความต่างศักย์” (Potential difference) การเขียนสัญลักษณ์ของแรงดันคร่อมองค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 การเขียนสัญลักษณ์ของแรงดันคร่อมองค์ประกอบ

สัญลักษณ์ของแรงดันในรูปที่ 1.5(ก) บ่งบอกว่าขั้วต่อ a มีศักย์สูงกว่าขั้วต่อ b อยู่เท่ากับ v นั่นคือเราต้องใช้พลังงานเท่ากับ v ในหน่วยจูล เพื่อเคลื่อนย้ายประจุบวก 1 C ผ่านองค์ประกอบจากขั้วต่อ b ไปยังขั้วต่อ a นอกจากนี้ เราอาจเขียนสัญลักษณ์ของแรงดันพร้อมกับอักษรตัวห้อยเพื่อแสดงการเปรียบเทียบศักย์ที่ขั้วต่อ ดังรูปที่ 1.5(ข) เราเขียน v_{ab} เพื่อแสดงถึงแรงดันที่ขั้วต่อ a เทียบกับขั้วต่อ b โดยกำหนดให้ขั้วต่อ a เป็นขั้วบวกและขั้วต่อ b เป็นขั้วลบ ซึ่งบ่งบอกว่าขั้วต่อ a มีศักย์สูงกว่าขั้วต่อ b อยู่เท่ากับ v_{ab} และหากเราเขียน v_{ba} เพื่อที่จะแสดงถึงแรงดันที่ขั้วต่อ b เทียบกับขั้วต่อ a โดยกำหนดให้ขั้วต่อ b เป็นขั้วบวกและขั้วต่อ a เป็นขั้วลบ ซึ่งบ่งบอกว่าขั้วต่อ b มีศักย์สูงกว่าขั้วต่อ a อยู่เท่ากับ v_{ba} เราสามารถกล่าวได้ว่าขั้วต่อ a มีศักย์สูงกว่าขั้วต่อ b อยู่เท่ากับ $-v_{ba}$ และจะได้ว่า $v_{ba} = -v_{ab}$

พิจารณาผลคูณของแรงดันคร่อมองค์ประกอบใด ๆ กับกระแสที่ผ่านองค์ประกอบนั้น จะพบว่า

$$v \cdot i = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{dw}{dt}$$

ซึ่งหมายถึงอัตราการใช้หรือรับพลังงาน และเป็นนิยามของกำลัง นั่นคือ

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.4)$$

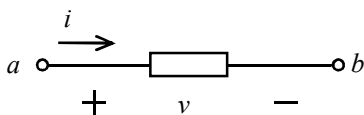
โดยที่ p คือกำลัง ในหน่วยของวัตต์ (watt, W) เราจึงได้

$$p = v \cdot i \quad (1.5)$$

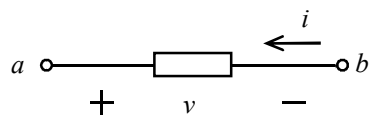
นั่นแสดงว่า กำลังที่องค์ประกอบได้รับหรือส่งจ่ายออกมาสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันคร่อมองค์ประกอบกับกระแสที่ผ่านองค์ประกอบนั้น นอกจากนี้ ค่าพลังงานที่องค์ประกอบใด ๆ ได้รับหรือส่งจ่ายในช่วงเวลา t วินาทีหาได้จากปริพันธ์ของกำลังที่องค์ประกอบได้รับหรือส่งจ่ายในช่วงเวลาดังกล่าว นั่นคือ

$$w = \int_0^t p \, dt = \int_0^t v \cdot i \, dt \quad (1.6)$$

การหาค่ากำลังหรือพลังงานที่องค์ประกอบได้รับหรือส่งจ่ายขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทางการไหลของกระแสและขั้วของแรงดันสำหรับองค์ประกอบใด ๆ ดังรูปที่ 1.6



(ก)



(ข)

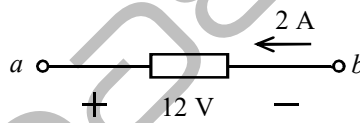
รูปที่ 1.6 การกำหนดทิศทางการไหลของกระแสและขั้วของแรงดันสำหรับองค์ประกอบใด ๆ

ในขณะที่กระแสไหลเข้าองค์ประกอบทางซ้ายและไหลออกทางขวาของแรงดันดังรูปที่ 1.6(ก) ประจุถูกผลักเคลื่อนด้วยพลังงานจากภายนอกองค์ประกอบ และสูญเสียพลังงานในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านองค์ประกอบจากซ้ายไปขวา เราจะกล่าวได้ว่า องค์ประกอบได้รับหรือดูดกลืนพลังงาน และในทางกลับกัน ขณะที่กระแสไหลเข้าองค์ประกอบทางซ้ายและไหลออกทางขวาของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 1.6(ข) ประจุถูกผลักเคลื่อนด้วยพลังงานจากภายในองค์ประกอบ และได้รับพลังงานในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านองค์ประกอบจากซ้ายไปขวา เราจะกล่าวได้ว่า องค์ประกอบส่งจ่ายพลังงานออกมา อย่างไรก็ตาม พลังงานที่องค์ประกอบได้รับหรือส่งจ่ายออกมาอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันและค่ากระแส หากพลังงานที่องค์ประกอบได้รับมีค่าเป็นลบ เราจะตีความว่า องค์ประกอบนั้นส่งจ่ายพลังงานออกมา และหากพลังงานที่องค์ประกอบส่งจ่ายออกมามีค่าเป็นลบ เราจะตีความว่า องค์ประกอบนั้นได้รับหรือดูดกลืนพลังงาน



ตัวอย่างที่ 1.8

จากรูปที่ 1.7 จงหาค่ากำลังที่องค์ประกอบได้รับ



รูปที่ 1.7 แรงดันและกระแสขององค์ประกอบสำหรับตัวอย่างที่ 1.8

วิธีทำ

เนื่องจากกระแสไหลเข้าองค์ประกอบทางซ้ายของแรงดัน เราจึงตีความได้ว่า องค์ประกอบส่งจ่ายกำลังออกมา และสามารถหาค่ากำลังที่ส่งจ่ายออกมาได้ดังนี้

$$p = v \cdot i = 12 \times 2 = 24 \text{ W}$$

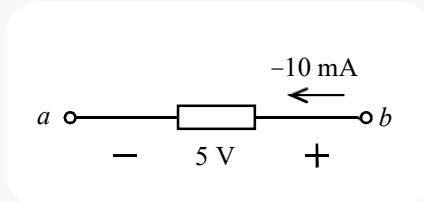
ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กำลังที่องค์ประกอบได้รับมีค่าเท่ากับ -24 W

#



ตัวอย่างที่ 1.9

จากรูปที่ 1.8 จงหาค่ากำลังที่องค์ประกอบส่งจ่ายออกมา



รูปที่ 1.8 แรงดันและกระแสขององค์ประกอบสำหรับตัวอย่างที่ 1.9

วิธีทำ

เนื่องจากกระแสไหลเข้าองค์ประกอบทางขั้วบวกของแรงดัน จึงตีความได้ว่า องค์ประกอบได้รับกำลัง และสามารถหาค่ากำลังที่ได้รับดังนี้

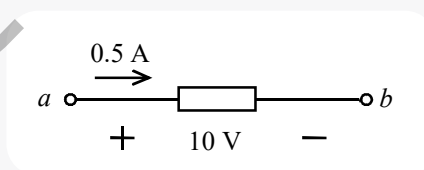
$$p = v \cdot i = 5 \times (-10 \times 10^{-3}) = -50 \text{ mW}$$

ซึ่งจะเห็นว่ากำลังที่องค์ประกอบได้รับมีค่าเป็นลบ แสดงว่ากำลังที่ส่งจ่ายออกมามีค่าเท่ากับ 50 mW #



ตัวอย่างที่ 1.10

จากรูปที่ 1.9 จงหาค่าพลังงานที่องค์ประกอบได้รับเป็นระยะเวลา 1 นาที



รูปที่ 1.9 แรงดันและกระแสขององค์ประกอบสำหรับตัวอย่างที่ 1.10

วิธีทำ

เนื่องจากกระแสไหลเข้าทางขั้วบวกของแรงดัน องค์ประกอบจึงได้รับกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$p = v \cdot i = 10 \times 0.5 = 5 \text{ W}$$

และหาค่าพลังงานที่องค์ประกอบได้รับเป็นระยะเวลา 1 นาทีซึ่งคิดเป็น 60 วินาทีได้ดังนี้

$$w = \int_0^t p \, dt = \int_0^{60} 5 \, dt = 5 \times 60 = 300 \text{ J} \quad \#$$

1.4 ตัวต้านทานและกฎของโอห์ม

องค์ประกอบที่พบเห็นและนิยมใช้กันมากที่สุดในวงจรไฟฟ้าคือตัวต้านทาน (Resistor) ตัวนำมีคุณสมบัติที่เป็นลักษณะเฉพาะของตัวต้านทาน นั่นคือ ในขณะที่กระแสไหลในตัวนำ อิเล็กตรอนจะชนแลตทิซ (Lattice) ของอะตอมในตัวนำ ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกขัดขวาง ยิ่งหากจำนวนครั้งของการชนมีค่ามาก กระแสที่ผ่านตัวนำจะมีค่าต่ำ คุณสมบัติทางกายภาพในการต้านการไหลของกระแสที่ผ่านองค์ประกอบนั้นเรียกว่า “ความต้านทาน” (Resistance) ทั้งนี้ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ จอร์จ ซีมอน โอห์ม (George Simon Ohm) ได้ให้นิยามของความต้านทานของตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอไว้ว่า

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (1.7)$$

โดยที่ R คือความต้านทานของตัวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω), l คือความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m), A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) และ ρ คือ “สภาพต้านทาน” (Resistivity) มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$) ซึ่งอธิบายความสามารถของวัสดุในการต้านการไหลของกระแส วัสดุที่เป็นตัวนำที่ดีจะมีสภาพต้านทานต่ำ เช่น เงินมีสภาพต้านทานเท่ากับ $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ทองแดงมีสภาพต้านทานเท่ากับ $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ และอะลูมิเนียมมีสภาพต้านทานเท่ากับ $2.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ในขณะที่วัสดุที่เป็นฉนวนที่ดีจะมีสภาพต้านทานสูง เช่น แก้วมีสภาพต้านทานในระดับ $10^{12} \Omega \cdot m$ และอากาศมีสภาพต้านทานในระดับ $10^{14} \Omega \cdot m$

ในปี ค.ศ. 1827 โอห์มได้เผยแพร่กฎของโอห์ม (Ohm's law) ซึ่งระบุว่า แรงดันคร่อมตัวต้านทานตัวหนึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ผ่านตัวต้านทานนั้น นั่นคือ

$$v = R \cdot i \quad (1.8)$$

และพบว่า หากความต้านทานมีค่าคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของตัวต้านทานจะมีทั้งสมบัติการทับซ้อนและสมบัติเอกพันธ์ ดังนั้น ตัวต้านทานที่มีคุณสมบัติตามกฎของโอห์มจึงเป็นองค์ประกอบเชิงเส้น



ตัวอย่างที่ 1.11

กำหนดให้ตัวต้านทาน $5 \text{ k}\Omega$ มีกระแส 2 mA ไหลผ่าน จงหาค่าแรงดันคร่อมตัวต้านทานดังกล่าว

วิธีทำ

จากกฎของโอห์ม เราสามารถหาค่าแรงดันคร่อมตัวต้านทานได้ดังนี้

$$v = R \cdot i = (5 \times 10^3) \times (2 \times 10^{-3}) = 10V$$



ตัวอย่างที่ 1.12

ถ้าจ่ายแรงดัน 12 V คร่อมตัวต้านทาน 400 Ω แล้วจะมีกระแสที่ผ่านตัวต้านทานดังกล่าวเท่าใด

วิธีทำ

จากกฎของโอห์ม เราสามารถหาค่ากระแสที่ผ่านตัวต้านทานได้ดังนี้

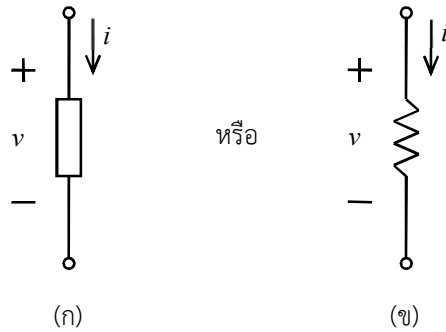
$$i = \frac{v}{R} = \frac{12}{400} = 30\text{mA} \quad \#$$

ในความเป็นจริง ตัวต้านทานโดยทั่วไปมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นเนื่องจากความต้านทานมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุด้วย เมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน กำลังที่ตัวต้านทานได้รับจะกลายเป็นความร้อน ทำให้อุณหภูมิของตัวต้านทานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าความต้านทานจึงไม่คงที่สำหรับทุกค่าของกระแสที่ผ่าน อย่างไรก็ตาม ในย่านการใช้งานที่เราต้องการ วัสดุจำนวนมากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวต้านทานเชิงเส้น ในเอกสารนี้เราจึงวิเคราะห์ตัวต้านทานในรูปแบบขององค์ประกอบเชิงเส้น ตัวอย่างตัวต้านทานที่ใช้งานทั่วไปแสดงดังรูปที่ 1.10



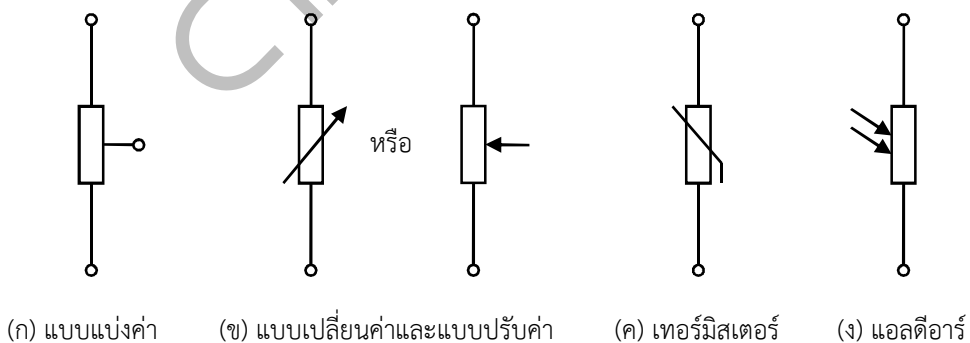
รูปที่ 1.10 ตัวต้านทานที่ใช้งานทั่วไป

ตัวต้านทานอาจถูกจำแนกได้หลายประเภทตามรูปแบบที่ผลิตขึ้นมา เช่น ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ ตัวต้านทานแบบแบ่งค่า ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่า ตัวต้านทานแบบปรับค่า ตัวต้านทานแบบพิเศษ เป็นต้น ตัวต้านทานแบบค่าคงที่มีค่าความต้านทานตายตัว สัญลักษณ์ของตัวต้านทานแบบค่าคงที่ในแผนภาพวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 สัญลักษณ์ของตัวต้านทานแบบค่าคงที่

ตัวต้านทานแบบแบ่งค่ามีค่าความต้านทานตายตัวเหมือนตัวต้านทานแบบค่าคงที่ แต่มีการแบ่งค่าความต้านทานให้เลือกใช้งานได้หลายค่า โดยใช้สัญลักษณ์ดังรูปที่ 1.12(ก) ส่วนตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่านั้น เราสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานในช่วงก่อนหรือหลังการใช้งาน และเปลี่ยนค่าได้ละเอียดกว่าตัวต้านทานแบบแบ่งค่า แต่สำหรับตัวต้านทานแบบปรับค่านั้น เราสามารถปรับค่าความต้านทานได้ละเอียดและปรับได้ตลอดเวลาแม้ในขณะที่กำลังใช้งาน สัญลักษณ์ของตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าและแบบปรับค่าแสดงดังรูปที่ 1.12(ข) นอกจากนี้ยังมีตัวต้านทานแบบพิเศษที่ถูกสร้างขึ้นมาทำหน้าที่บางอย่างโดยเฉพาะและมีชื่อเรียกต่างกันไปตามคุณสมบัติที่ใช้งาน เช่น เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ซึ่งเปลี่ยนค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ และใช้สัญลักษณ์ดังรูปที่ 1.12(ค) และตัวต้านทานไวแสงหรือแอลดีอาร์ (Light-dependent resistor, LDR) ซึ่งเปลี่ยนค่าความต้านทานตามความเข้มของแสงสว่างที่ตกกระทบ และใช้สัญลักษณ์ดังรูปที่ 1.12(ง)



(ก) แบบแบ่งค่า (ข) แบบเปลี่ยนค่าและแบบปรับค่า (ค) เทอร์มิสเตอร์ (ง) แอลดีอาร์

รูปที่ 1.12 สัญลักษณ์ของตัวต้านทานที่มีความต้านทานให้เลือกใช้งานได้หลายค่า

หากระหว่าง 2 จุดใด ๆ ในวงจรถูกเชื่อมต่อกันด้วยตัวนำที่มีค่าความต้านทานเท่ากับศูนย์ เราจะเรียกว่า “วงจรลัด” (Short circuit) ดังรูปที่ 1.13(ก) วงจรลัดเป็นตัวนำในอุดมคติซึ่งไม่มีความต้านทานจึงไม่มีความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองข้างของวงจรลัด ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านวงจรลัดจะถูกกำหนดโดยส่วนที่เหลือของวงจร แต่แรงดันคร่อมวงจรลัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ผ่าน และหากว่าระหว่าง 2 จุดใด ๆ ในวงจรมีความต้านทานเป็นอนันต์ เราจะเรียกว่า “วงจรเปิด” (Open circuit) ดังรูปที่ 1.13(ข) ค่าแรงดันคร่อมวงจรเปิดขึ้นอยู่กับส่วนที่เหลือของวงจร แต่กระแสที่ผ่านวงจรเปิดจะมีค่าเท่ากับศูนย์โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันคร่อมวงจรเปิด



รูปที่ 1.13 การอธิบายวงจรลัดและวงจรเปิดในรูปของความต้านทาน

นอกจากค่าความต้านทานแล้ว “พิกัดกำลัง” (Power rating) เป็นอีกหนึ่งรายละเอียดที่สำคัญของตัวต้านทานทุกตัว พิกัดกำลังบ่งบอกถึงค่ากำลังสูงสุดที่ตัวต้านทานจะรับได้โดยไม่ทำให้ตัวต้านทานเสียหาย เนื่องจากกำลังที่ตัวต้านทานได้รับจะกลายเป็นความร้อน หากอัตราการเกิดความร้อนในตัวต้านทานมีค่าเท่ากับอัตราการระบายความร้อนออกจากตัวต้านทาน อุณหภูมิของตัวต้านทานจะมีค่าคงที่ แต่หากกำลังที่ตัวต้านทานได้รับอย่างต่อเนื่องมีค่าสูงกว่าพิกัดกำลังของตัวต้านทาน อุณหภูมิของตัวต้านทานจะเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้ตัวต้านทานเสียหาย ดังนั้นในการเลือกตัวต้านทานมาใช้งาน นอกจากค่าความต้านทานที่เราต้องการแล้ว ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าพิกัดกำลังของตัวต้านทานด้วย พิจารณาสูตรที่ใช้หาค่ากำลังจากผลคูณของแรงดันและกระแสของตัวต้านทานร่วมกับกฎของโอห์ม เราจะได้

$$p = v \cdot i = i^2 R = \frac{v^2}{R} \quad (1.9)$$



ตัวอย่างที่ 1.13

จงหาค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านตัวต้านทานต่อไปนี้อย่างต่อเนื่องได้โดยไม่ทำให้ตัวต้านทานเสียหาย

ก) ตัวต้านทาน $100\ \Omega$ มีพิกัดกำลัง $1\ \text{W}$

ข) ตัวต้านทาน $100\ \Omega$ มีพิกัดกำลัง $250\ \text{mW}$

วิธีทำ

ก) หาค่ากระแสสูงสุดที่ไม่ทำให้ตัวต้านทาน $100\ \Omega$ ซึ่งมีพิกัดกำลัง $1\ \text{W}$ เสียหาย
จาก

$$p = i^2 R$$

ดังนั้น กระแสสูงสุดสำหรับตัวต้านทานตัวนี้มีค่าเท่ากับ

$$i = \sqrt{\frac{p}{R}} = \sqrt{\frac{1}{100}} = 100\ \text{mA} \quad \#$$

ข) หาค่ากระแสสูงสุดที่ไม่ทำให้ตัวต้านทาน $100\ \Omega$ ซึ่งมีพิกัดกำลัง $250\ \text{mW}$ เสียหาย
กระแสสูงสุดสำหรับตัวต้านทานตัวนี้มีค่าเท่ากับ

$$i = \sqrt{\frac{p}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{100}} = 50\ \text{mA} \quad \#$$

และเปรียบเทียบกับข้อ ก) จะเห็นว่า ถึงแม้มีความต้านทานเท่ากัน แต่หากมีพิกัดกำลังต่ำกว่าย่อมทนกระแสได้น้อยกว่า



ตัวอย่างที่ 1.14

กำหนดให้ตัวต้านทาน $100\ \Omega$ มีแรงดันคร่อม $5\ \text{V}$ จงหาค่ากำลังและพลังงานที่ตัวต้านทานนี้ได้รับ
เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

วิธีทำ

ค่ากำลังที่ตัวต้านทานได้รับสามารถหาได้จาก

$$p = \frac{v^2}{R} = \frac{5^2}{100} = 250\ \text{mW} \quad \#$$

และค่าพลังงานที่ตัวต้านทานได้รับเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงซึ่งคิดเป็น $3,600$ วินาที หาได้ดังนี้

$$w = \int_0^t p\ dt = \int_0^{3600} 0.25\ dt = 0.25 \times 3600 = 900\ \text{J} \quad \#$$

1

2

3

4

5

6

7

8

9

นอกจากนี้ อีกหนึ่งปริมาณที่สำคัญและมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าคือ “ความนำ” (Conductance) ใช้สัญลักษณ์ G ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นส่วนกลับของความต้านทาน นั่นคือ

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.10)$$

และมีหน่วยเป็นซีเมนส์ (siemens) ใช้สัญลักษณ์ของหน่วยเป็น S หรืออาจใช้หน่วยโมห์ (mho) จะเห็นว่า องค์ประกอบใดที่มีค่าความต้านทานสูงจะมีค่าความนำต่ำ และในทางกลับกัน หากมีค่าความต้านทานต่ำจะมีค่าความนำสูง เราจึงสามารถแสดงกฎของโอห์มในรูปของความนำได้เป็น

$$i = G \cdot v \quad (1.11)$$

และแสดงสูตรที่ใช้หากำลังได้เป็น

$$p = v \cdot i = \frac{i^2}{G} = Gv^2 \quad (1.12)$$



ตัวอย่างที่ 1.15

กำหนดให้องค์ประกอบซึ่งมีความนำ 0.1 S ได้รับแรงดันคร่อม 10 V จงหาค่ากระแสที่ผ่านและ กำลังที่องค์ประกอบนี้ได้รับ

วิธีทำ

กระแสที่ผ่านองค์ประกอบมีค่าเท่ากับ

$$i = G \cdot v = 0.1 \times 10 = 1 \text{ A} \quad \#$$

และค่ากำลังที่องค์ประกอบได้รับสามารถหาได้จาก

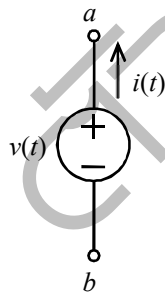
$$p = G \cdot v^2 = 0.1 \times 10^2 = 10 \text{ W} \quad \#$$

1.5 แหล่งกำเนิด

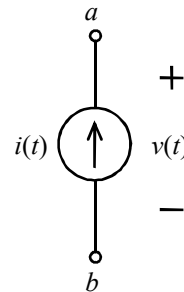
แหล่งกำเนิดเป็นองค์ประกอบ 2 ขั้วต่อที่มีหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับองค์ประกอบอื่นในวงจรไฟฟ้า ซึ่งอาจจำแนกตามชนิดของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้ 2 ชนิดคือ แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage source) และแหล่งกำเนิดกระแส (Current source) ซึ่งสัญญาณที่จ่ายออกมาอาจมีค่าคงที่หรือเป็นฟังก์ชันของเวลา

แหล่งกำเนิดที่จ่ายแรงดันค่าหนึ่งออกมาและรักษาค่าแรงดันนั้นไว้โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ผ่านแหล่งกำเนิดนั้นและไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันหรือกระแสในส่วนอื่นของวงจร เรียกว่า “แหล่งกำเนิดแรงดันอิสระ” (Independent voltage source) เช่น แบตเตอรี่ (Battery) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 1.14(ก) เครื่องหมายบวกและลบของแหล่งกำเนิดบ่งบอกให้ทราบว่าขั้วต่อ a มีศักย์สูงกว่าขั้วต่อ b อยู่เท่ากับ $v(t)$ ซึ่งแรงดันของแหล่งกำเนิดนี้อาจมีค่าคงที่ เช่น $v(t) = 15 \text{ V}$ หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น $v(t) = 5 - t \text{ V}$ หรือ $v(t) = 5 \sin 100t \text{ V}$ ในขณะที่ค่ากระแสที่ผ่านแหล่งกำเนิดนี้จะขึ้นอยู่กับส่วนที่เหลือของวงจร

แหล่งกำเนิดที่จ่ายกระแสค่าหนึ่งออกมาโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่คร่อมแหล่งกำเนิดนั้นและไม่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันหรือกระแสในส่วนอื่นของวงจร เรียกว่า “แหล่งกำเนิดกระแสอิสระ” (Independent current source) ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 1.14(ข) โดยที่ลูกศรในสัญลักษณ์บ่งบอกถึงทิศทางการไหลของกระแส $i(t)$ ซึ่งกระแสของแหล่งกำเนิดนี้อาจมีค่าคงที่ เช่น $i(t) = 5 \text{ A}$ หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น $i(t) = t + 1 \text{ A}$ หรือ $i(t) = 2 \cos 5t \text{ A}$ ส่วนค่าแรงดันคร่อมแหล่งกำเนิดนี้จะขึ้นอยู่กับส่วนที่เหลือของวงจร



(ก) แหล่งกำเนิดแรงดันอิสระ



(ข) แหล่งกำเนิดกระแสอิสระ

รูปที่ 1.14 สัญลักษณ์ของแหล่งกำเนิดอิสระ

อย่างไรก็ตาม แหล่งกำเนิดอิสระที่อธิบายข้างต้นถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดอุดมคติ (Ideal sources) ซึ่งมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดจริงในบางเงื่อนไข เช่น ในขณะที่แบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับโหลด ระดับแรงดันที่ขั้วต่อของแบตเตอรี่มีค่าค่อนข้างคงที่ในระยะเวลาหนึ่งหากว่ากระแสที่ไหลออกจากแบตเตอรี่

มีค่าต่ำ เพราะในความเป็นจริง แรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่ใช้งานจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และระดับแรงดันของแบตเตอรี่จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัดหากกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายให้โหลดมีค่าสูง

เราสามารถอธิบายคุณลักษณะของวงจรลัดและวงจรเปิดด้วยรูปแบบของแหล่งกำเนิดอุดมคติได้ ดังรูปที่ 1.15 โดยในที่นี้ วงจรลัดถูกอธิบายในรูปของแหล่งกำเนิดแรงดันอุดมคติ (Ideal voltage source) ที่มีค่าแรงดันคงที่เท่ากับศูนย์ และค่ากระแสที่ผ่านวงจรลัดจะขึ้นอยู่กับส่วนที่เหลือของวงจร ในขณะที่วงจรเปิดถูกอธิบายในรูปของแหล่งกำเนิดกระแสอุดมคติ (Ideal current source) ที่จ่ายกระแสคงที่เท่ากับศูนย์ และค่าแรงดันคร่อมวงจรเปิดจะขึ้นอยู่กับส่วนที่เหลือของวงจร

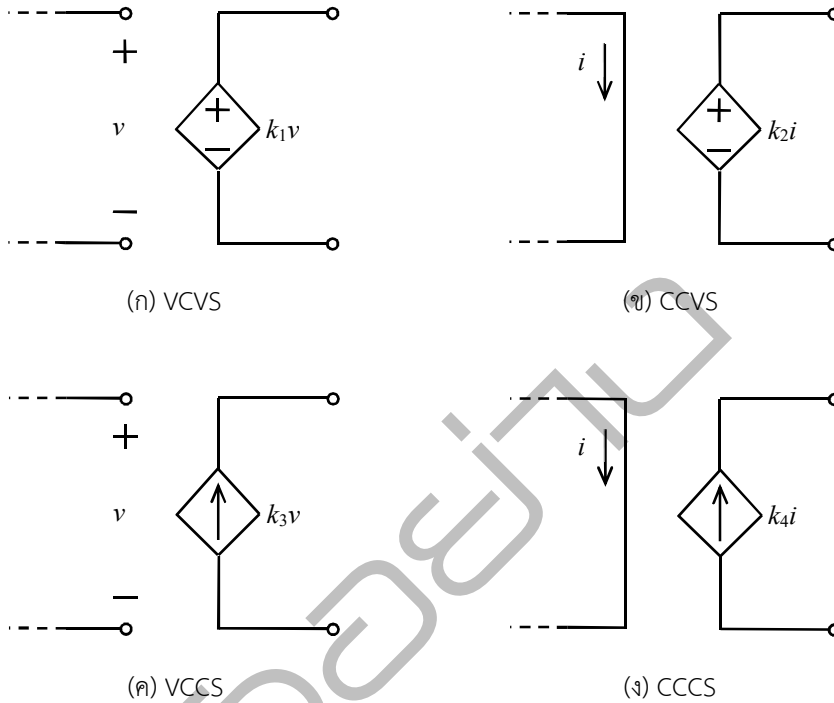


รูปที่ 1.15 การอธิบายวงจรลัดและวงจรเปิดในรูปของแหล่งกำเนิดอุดมคติ

ในกรณีที่แรงดันหรือกระแสขององค์ประกอบหนึ่งในวงจรมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันหรือกระแสในส่วนอื่นของวงจรเดียวกัน เราสามารถอธิบายเหตุการณ์ดังกล่าวโดยใช้ “แหล่งกำเนิดไม่อิสระ” (Dependent sources) ซึ่งนิยมนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมขององค์ประกอบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistors) ซึ่งมีค่ากระแสคอลเลกเตอร์ (Collector current) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสเบส (Base current) หรือใช้อธิบายการทำงานของวงจรขยายแรงดัน (Voltage amplifiers) ซึ่งมีค่าแรงดันด้านออก (Output voltage) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงดันด้านเข้า (Input voltage)

ส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดไม่อิสระมี 2 ส่วนคือ ตัวแปรควบคุมซึ่งอาจเป็นค่าแรงดันหรือกระแสในส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร และส่วนที่ถูกควบคุมซึ่งแสดงอยู่ในรูปของแหล่งกำเนิดแรงดันหรือแหล่งกำเนิดกระแสและใช้สัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน เราสามารถจำแนกแหล่งกำเนิดไม่อิสระได้เป็น 4 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 1.16 นั่นคือ แหล่งกำเนิดแรงดันที่ใช้แรงดันควบคุม (Voltage-controlled voltage source, VCVS) แหล่งกำเนิดแรงดันที่ใช้กระแสควบคุม (Current-controlled voltage source, CCVS) แหล่งกำเนิดกระแสที่ใช้แรงดันควบคุม (Voltage-controlled current source, VCCS) และแหล่งกำเนิดกระแสที่ใช้กระแสควบคุม (Current-controlled current source, CCCS) จะเห็นว่า ค่าแรงดันของ VCVS ถูกควบคุมด้วยแรงดัน v โดยมี k_1 เป็นอัตราขยาย (Gain) ซึ่งไม่มีหน่วย ค่าแรงดันของ CCVS ถูกควบคุมด้วย

กระแส i โดยมี k_2 เป็นอัตราขยายซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อแอมแปร์หรือโอห์ม ในขณะที่ค่ากระแสของ VCCS ถูกควบคุมด้วยแรงดัน v โดยมี k_3 เป็นอัตราขยายซึ่งมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อโวลต์หรือซีเมนส์ และค่ากระแสของ CCCS ถูกควบคุมด้วยกระแส i โดยมี k_4 เป็นอัตราขยายซึ่งไม่มีหน่วย

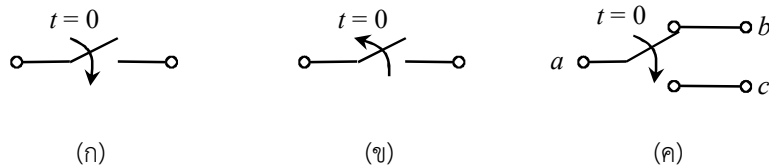


รูปที่ 1.16 แหล่งกำเนิดไม่อิสระ

1.6 สวิตช์

หน้าที่ของสวิตช์ในวงจรไฟฟ้าคือ การตัดวงจรและการต่อวงจร การทำงานของสวิตช์จึงมี 2 สถานะ คือ เปิดและปิด สวิตช์ในอุดมคติจะทำตัวเป็นวงจรเปิดเมื่อสวิตช์ตัดวงจรหรืออยู่ในสถานะเปิด นั่นคือ สวิตช์มีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ จึงไม่มีกระแสผ่านสวิตช์ และสวิตช์จะทำตัวเป็นวงจรลัดเมื่อต่อวงจรหรืออยู่ในสถานะปิด นั่นคือ ความต้านทานของสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปเรานิยมใช้สวิตช์เพื่อควบคุมการส่งผ่านกำลังในวงจร การเปลี่ยนสถานะของสวิตช์มักทำให้ลักษณะการเชื่อมต่อขององค์ประกอบในวงจรเปลี่ยนแปลงไป

สัญลักษณ์ของสวิตช์ชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 1.17 โดยที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะที่เวลา $t = 0$ สวิตช์ในรูปที่ 1.17(ก) ทำตัวเป็นวงจรเปิดเพื่อตัดวงจรในช่วงเวลาที่ $t < 0$ และต่อวงจรโดยทำตัวเป็นวงจรลัดในช่วงเวลาที่ $t > 0$ ในขณะที่สวิตช์ในรูปที่ 1.17(ข) ทำตัวเป็นวงจรลัดเพื่อต่อวงจรในช่วงที่ $t < 0$ และตัดวงจรโดยทำตัวเป็นวงจรเปิดในช่วงเวลาที่ $t > 0$



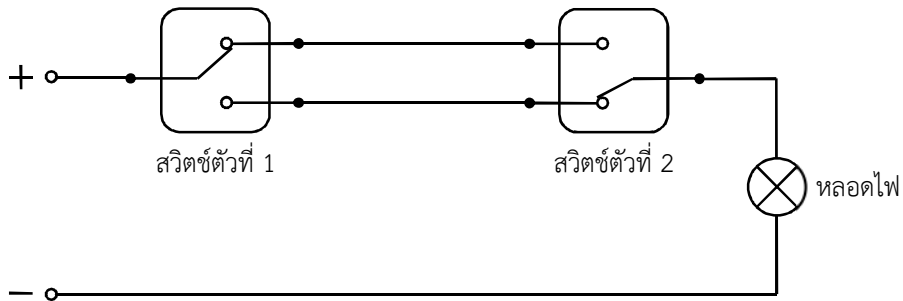
รูปที่ 1.17 สัญลักษณ์ของสวิตช์ชนิดต่าง ๆ

สำหรับสวิตช์ในรูปที่ 1.17(ค) เราสามารถใช้กำหนดการเชื่อมต่อได้ 2 เส้นทางคือ $a-b$ และ $a-c$ จึงอาจเรียกสวิตช์ชนิดนี้ว่า “สวิตช์สองทาง” (Two-way switch) โดยในช่วงเวลาที่ $t < 0$ จะต่อวงจรในเส้นทาง $a-b$ และตัดวงจรในเส้นทาง $a-c$ และในช่วงที่ $t > 0$ จะตัดวงจรในเส้นทาง $a-b$ และต่อวงจรในเส้นทาง $a-c$ สถานะของสวิตช์ในรูปที่ 1.17 ในช่วงก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะสรุปได้ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 สถานะของสวิตช์ในช่วงก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะ

สวิตช์	สถานะ	
	$t < 0$	$t > 0$
รูปที่ 1.17(ก)	เปิด	ปิด
รูปที่ 1.17(ข)	ปิด	เปิด
รูปที่ 1.17(ค)	$(a-b)$ ปิด, $(a-c)$ เปิด	$(a-b)$ เปิด, $(a-c)$ ปิด

เราสามารถนำสวิตช์สองทาง 2 ตัวมาใช้เพื่อเปิดและปิดไฟตามทางเดินยาว โดยติดตั้งสวิตช์ที่ปลายทางเดินแต่ละด้าน หรือใช้เพื่อเปิดและปิดไฟบันได โดยติดตั้งสวิตช์ 1 ตัวไว้ที่ชั้นล่างและติดตั้งอีกตัวไว้ที่ชั้นบน ทำให้สามารถเปิดและปิดไฟด้วยสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งได้ การเชื่อมต่อสวิตช์สองทาง 2 ตัวเพื่อเปิดและปิดไฟด้วยสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1.18

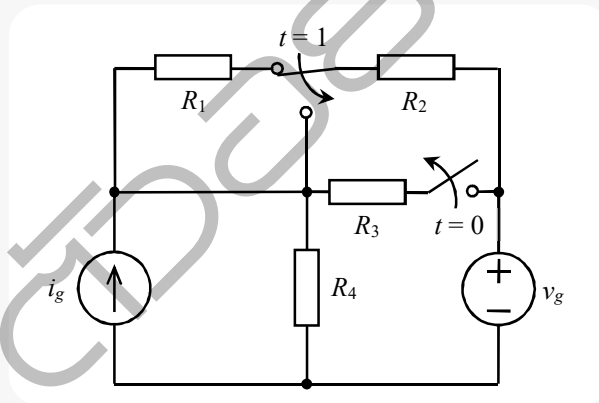


รูปที่ 1.18 การเชื่อมต่อสวิตช์สองทางสำหรับเปิดและปิดไฟ



ตัวอย่างที่ 1.16

จากรูปที่ 1.19 จงวาดแผนภาพการเชื่อมต่อวงจรในช่วงเวลาที่ $t < 0$, $0 < t < 1$ s และ $t > 1$ s

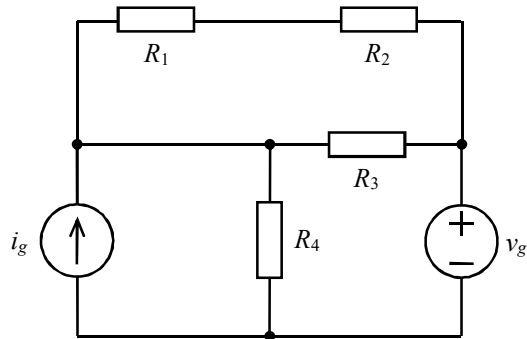


รูปที่ 1.19 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 1.16

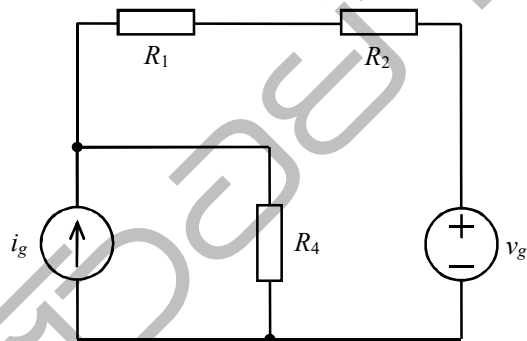
วิธีทำ

ในช่วงเวลาที่ $t < 0$ สวิตช์ทั้งสองตัวยังไม่เปลี่ยนสถานะ ทำให้ R_1 และ R_2 ยังเชื่อมต่อกัน และ R_3 ยังเชื่อมต่อกับขั้วบวกของ v_g การเชื่อมต่อของวงจรในช่วงนี้จึงแสดงได้ดังรูปที่ 1.20 หลังจากนั้น ในช่วงเวลาที่ $0 < t < 1$ s มีเพียงสวิตช์ตัวล่างในแผนภาพที่เปลี่ยนสถานะและทำตัวเป็นวงจรเปิด การเชื่อมต่อของวงจรในช่วงเวลาดังกล่าวจึงแสดงได้ดังรูปที่ 1.21 และหลังจากที่เวลา $t > 1$ s สวิตช์ตัวบนจึงเปลี่ยนสถานะโดยเชื่อมต่อ R_2 กับ R_4 ในขณะที่สวิตช์ตัวล่างยังคงเปิดวงจร เราจะแสดงการเชื่อมต่อของวงจรในช่วงเวลานี้ได้ดังรูปที่ 1.22

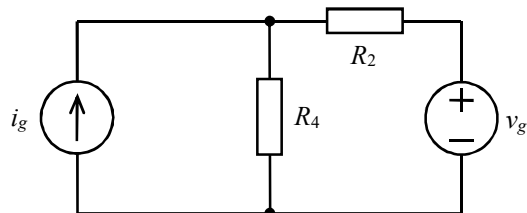
1
2
3
4
5
6
7
8
9



รูปที่ 1.20 วงจรในรูปที่ 1.19 ในช่วงเวลา $t < 0$



รูปที่ 1.21 วงจรในรูปที่ 1.19 ในช่วงเวลา $0 < t < 1$ s



รูปที่ 1.22 วงจรในรูปที่ 1.19 ในช่วงเวลาที่ $t > 1$ s

1.7 แหล่งกำเนิดสัญญาณขั้น

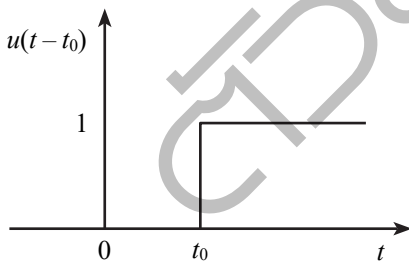
ในกรณีที่แหล่งกำเนิดถูกเชื่อมต่อหรือถูกปลดออกจากวงจรที่เวลา $t = t_0$ ย่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของแรงดันหรือกระแสที่จุดเชื่อมต่อ นั้น และส่งผลต่อแรงดันและกระแสในหลายส่วนของวงจร ให้เปลี่ยนแปลงค่าอย่างฉับพลันตามไปด้วย การเชื่อมต่อหรือการปลดแหล่งกำเนิดออกจากวงจรถัดกล่าวสามารถแสดงอยู่ในรูปของแหล่งกำเนิดอิสระที่ต่อร่วมกับสวิตช์ซึ่งเปลี่ยนสถานะที่เวลา $t = t_0$ และเราสามารถเขียนอธิบายการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสัญญาณเข้าซึ่งวงจรได้รับจากแหล่งกำเนิดได้ด้วย “ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย” (Unit step function) นั่นคือ $u(t - t_0)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $t < t_0$ และมีค่าเท่ากับหนึ่งเมื่อ $t > t_0$ โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$u(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (1.13)$$

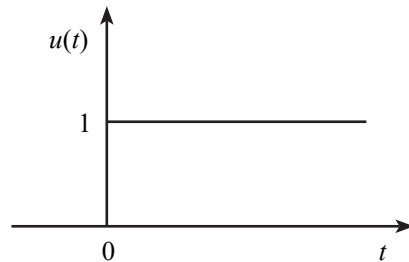
โดยในที่นี้ เราไม่ระบุค่า $u(t - t_0)$ ที่เวลา $t = t_0$ เพราะฟังก์ชันมีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 อย่างฉับพลัน และกำหนดให้ $t_0 = 0$ จะได้

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

และแสดงกราฟ $u(t - t_0)$ และ $u(t)$ ได้ดังรูปที่ 1.23



(ก) กราฟ $u(t - t_0)$



(ข) กราฟ $u(t)$

รูปที่ 1.23 กราฟขั้นหนึ่งหน่วย

ในกรณีที่แหล่งกำเนิดถูกปลดออกจากวงจรที่เวลา $t = 0$ เราสามารถเขียนอธิบายด้วย $u(-t)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้มีค่าเท่ากับหนึ่งเมื่อ $t < 0$ และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $t > 0$ โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$u(-t) = \begin{cases} 1, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

1

2

3

4

5

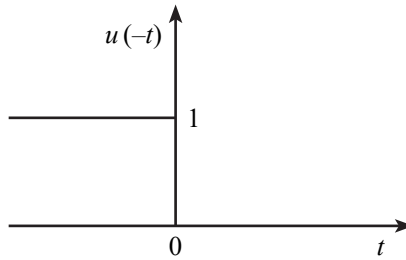
6

7

8

9

และแสดงกราฟ $u(-t)$ ได้ดังรูปที่ 1.24

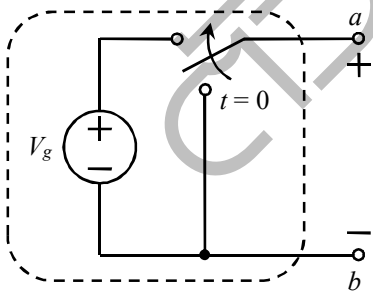


รูปที่ 1.24 กราฟ $u(-t)$

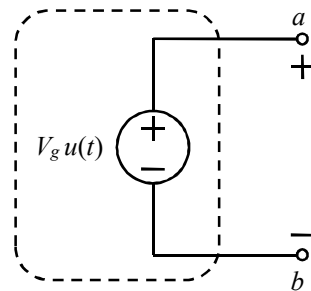
เราสามารถใช้ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยเพื่ออธิบายสัญญาณที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง เช่น สัญญาณขั้นแรงดัน Voltage step) ที่ขั้วต่อ $a-b$ ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแรงดันที่เวลา $t = 0$ ในรูปที่ 1.25(ก) โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ $t < 0$ แรงดันคร่อมขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และในช่วงเวลาที่ $t > 0$ แรงดันคร่อมขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับ V_g ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยได้ว่า

$$V_g u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_g, & t > 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

และแสดงเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นแรงดันได้ดังรูปที่ 1.25(ข)



(ก) การต่อแหล่งกำเนิดแรงดันที่เวลา $t = 0$



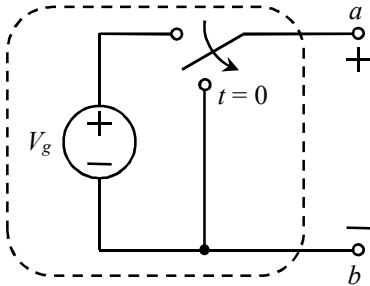
(ข) แหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นแรงดัน

รูปที่ 1.25 การจ่ายแรงดัน V_g คร่อมขั้วต่อ $a-b$ ในช่วงเวลาที่ $t > 0$

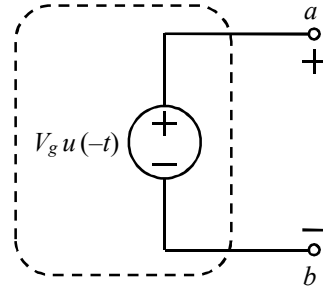
สำหรับการอธิบายสัญญาณขั้นแรงดันคร่อมขั้วต่อ $a-b$ ซึ่งเกิดจากการปลดแหล่งกำเนิดแรงดันออกที่เวลา $t = 0$ ดังรูปที่ 1.26(ก) นั่นคือ ในช่วงเวลาที่ $t < 0$ แรงดันคร่อมขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับ V_g และในช่วงเวลาที่ $t > 0$ แรงดันคร่อมขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เราเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยได้ดังนี้

$$V_g u(-t) = \begin{cases} V_g, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases} \quad (1.17)$$

และแสดงเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นแรงดันได้ดังรูปที่ 1.26(ข)



(ก) การแสดงในรูปของสวิตช์



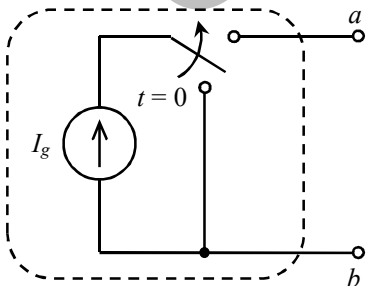
(ข) การแสดงในรูปฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย

รูปที่ 1.26 การหยุดจ่ายแรงดัน V_g คร่อมขั้วต่อ $a-b$ ในช่วงเวลาที่ $t > 0$

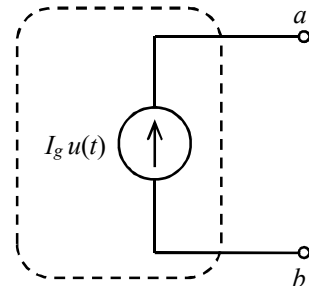
ในทำนองเดียวกัน เราสามารถใช้ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยเพื่ออธิบายสัญญาณขั้นกระแส (Current step) ที่จ่ายผ่านขั้วต่อ $a-b$ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดกระแสที่เวลา $t = 0$ ดังรูปที่ 1.27(ก) โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ $t < 0$ กระแสที่ผ่านขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และในช่วงเวลาที่ $t > 0$ กระแสที่ผ่านขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับ I_g ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยได้ดังนี้

$$I_g u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ I_g, & t > 0 \end{cases} \quad (1.18)$$

และแสดงเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นกระแสได้ดังรูปที่ 1.27(ข)



(ก) การต่อแหล่งกำเนิดกระแสที่เวลา $t = 0$



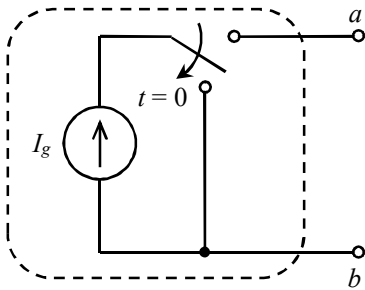
(ข) แหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นกระแส

รูปที่ 1.27 การจ่ายกระแส I_g ผ่านขั้วต่อ $a-b$ ในช่วงเวลาที่ $t > 0$

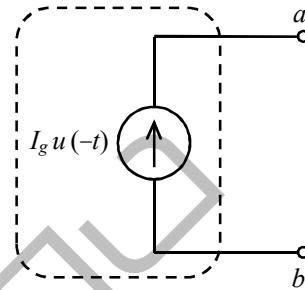
สำหรับการอธิบายสัญญาณขั้นกระแสที่จ่ายผ่านขั้วต่อ $a-b$ ซึ่งเป็นผลจากการปลดแหล่งกำเนิด กระแสที่เวลา $t = 0$ ดังรูปที่ 1.28(ก) นั่นคือ ในช่วงเวลาที่ $t < 0$ กระแสที่ผ่านขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับ I_g และ ในช่วงเวลาที่ $t > 0$ กระแสที่ผ่านขั้วต่อ $a-b$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เราเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยได้ว่า

$$I_g u(-t) = \begin{cases} I_g, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$$

และแสดงเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นกระแสดังรูปที่ 1.28(ข)



(ก) การปลดแหล่งกำเนิดกระแสที่เวลา $t = 0$



(ข) แหล่งกำเนิดสัญญาณขั้นกระแส

รูปที่ 1.28 การหยุดจ่ายกระแส I_g ผ่านขั้วต่อ $a-b$ ในช่วงเวลาที่ $t > 0$

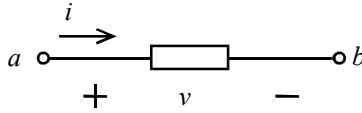
1.8 สรุป

- ส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้ามี 4 ส่วนคือ แหล่งกำเนิด โหลด ระบบส่งผ่าน และอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งสามารถอธิบายในรูปขององค์ประกอบวงจร และการเชื่อมต่อขององค์ประกอบดังกล่าวเป็นเส้นทางปิดทำให้เกิดเป็นวงจรไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนแสดงด้วยแผนภาพวงจรไฟฟ้า
- กระแสถูกกำหนดให้เป็นการเคลื่อนที่ของประจุบวก ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)
- แรงเคลื่อนไฟฟ้า คือความสามารถในการขับเคลื่อนกระแสในวงจร มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดใด ๆ ในวงจร คือ ผลต่างระหว่างค่าศักย์ของทั้งสองจุดนั้น มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- ในการกำหนดทิศทางอ้างอิงร่วมของกระแสที่ผ่านองค์ประกอบกับแรงดันคร่อมองค์ประกอบนั้น เรานิยามกำหนดให้กระแสไหลเข้าองค์ประกอบทางขั้วบวกของแรงดันและไหลออกทางขั้วลบของแรงดัน
- กำลัง คืออัตราการทำงานหรืออัตราการแปรสภาพพลังงาน มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ในขณะทีพลังงานบ่งบอกถึงความสามารถในการทำงาน มีหน่วยเป็นจูล (J)
- แหล่งกำเนิดอิสระทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับวงจรโดยมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นใดในวงจร
- แหล่งกำเนิดไม่อิสระถูกใช้จำลองสถานการณ์ที่แรงดันหรือกระแสขององค์ประกอบหนึ่งมีค่าแปรผันโดยตรงกับแรงดันหรือกระแสขององค์ประกอบอีกตัวในวงจรเดียวกัน
- วงจรลัด คือสภาวะที่แรงดันคร่อมสองขั้วต่อใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์โดยไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ผ่านขั้วต่อทั้งสองนั้น
- วงจรเปิด คือสภาวะที่ไม่มีกระแสไหลผ่านสองขั้วต่อใด ๆ โดยไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อมขั้วต่อทั้งสอง
- การทำงานของสวิตช์มี 2 สถานะคือเปิดและปิด สวิตช์ในอุดมคติมีความต้านทานเป็นอนันต์หรือทำตัวเป็นวงจรเปิดเมื่อสวิตช์เปิด และมีความต้านทานเท่ากับศูนย์หรือทำตัวเป็นวงจรลัดเมื่อสวิตช์ปิด
- เราสามารถใช้ฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยเพื่ออธิบายสัญญาณที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง เช่น สัญญาณขั้นแรงดันหรือสัญญาณขั้นกระแส โดยที่

$$u(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases}$$



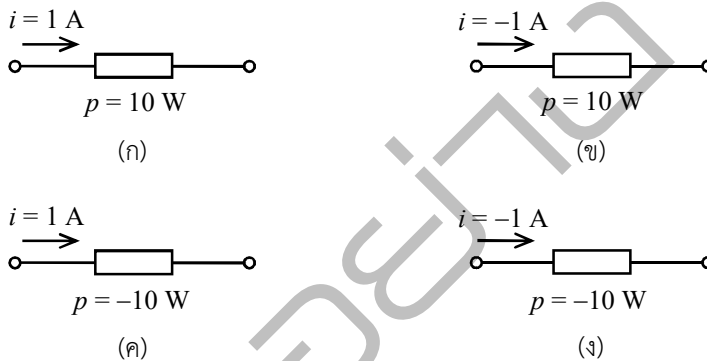
- 32



รูปที่ 1.29 การกำหนดแรงดันและกระแสขององค์ประกอบสำหรับแบบฝึกหัดข้อที่ 9

10. จงหาค่าและกำหนดขั้วของแรงดันคร่อมองค์ประกอบประกอบในรูปที่ 1.30

คำตอบ: ก) $+10\text{ V}$ -, ข) -10 V +, ค) -10 V + และ ง) $+10\text{ V}$ -



รูปที่ 1.30 ค่ากระแสที่ผ่านองค์ประกอบและกำลังที่ได้รับสำหรับแบบฝึกหัดข้อที่ 10

11. กำหนดให้แหล่งกำเนิดแรงดัน 6 V จ่ายกระแสคงที่ 1.5 A จงคำนวณค่าพลังงานที่แหล่งกำเนิดจ่ายออกมาเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

คำตอบ: 32.4 kJ

12. สายไฟเส้นหนึ่งมีความต้านทาน $10\ \Omega$ สายไฟอีกเส้นหนึ่งจะมีความต้านทานเท่าใดหากทำจากวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีความยาวเป็น 2 เท่าและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นแรก

คำตอบ: 4 เท่า

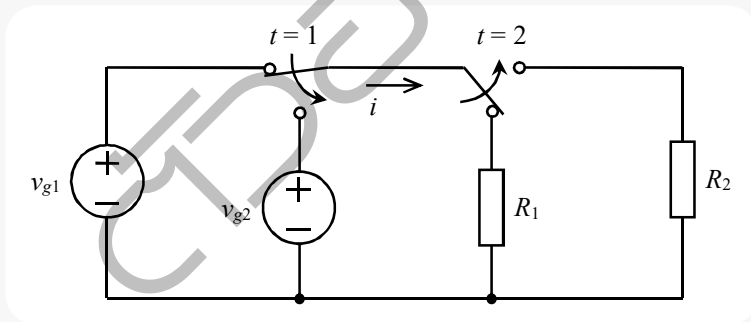
13. สายไฟเส้นหนึ่งยาว 240 m มีความต้านทาน $12\ \Omega$ หากว่าต้องการให้มีความต้านทานลดลงเหลือ $10\ \Omega$ ต้องตัดสายไฟออกกี่เมตร

คำตอบ: 40 m

14. ตัวนำตัวหนึ่งมีกระแส 50 mA ไหลผ่าน และมีแรงดันคร่อมเท่ากับ 15 V จงหาค่าความต้านทานของตัวนำดังกล่าว

คำตอบ: $300\ \Omega$

15. แบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 12 V ต่อกับหลอดไฟที่มีความต้านทาน 24Ω จงหาค่ากระแสที่ผ่านหลอดไฟ
คำตอบ: 0.5 A
16. ตัวนำที่มีความต้านทานคงที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแส ในขณะที่กระแสของแหล่งกำเนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แรงดันคร่อมตัวนำนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากเดิมอย่างไร
คำตอบ: มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า
17. กำหนดให้มีกระแส 20 mA ไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่อกับแหล่งกำเนิดแรงดัน 25 V จงหาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานนี้เมื่อค่าแรงดันของแหล่งกำเนิดลดลงเหลือ 10 V
คำตอบ: 8 mA
18. เราต้องใช้ตัวต้านทานค่าใดมาต่อกับแหล่งกำเนิดกระแส 50 mA เพื่อให้แรงดันคร่อมตัวต้านทานนี้มีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมตัวต้านทาน 750Ω ที่ต่อกับแหล่งกำเนิดกระแส 20 mA
คำตอบ: 300 Ω
19. จากรูปที่ 1.31 กำหนดให้ $v_{g1} = 20$ V, $v_{g2} = 15$ V, $R_1 = 500 \Omega$ และ $R_2 = 600 \Omega$ จงหาค่า i ในช่วงเวลาที่ $t < 1$ s, $1 < t < 2$ s และ $t > 2$ s
คำตอบ: 40 mA, 30 mA และ 25 mA



รูปที่ 1.31 วงจรสำหรับแบบฝึกหัดข้อที่ 19

20. กำหนดให้

$$v_g = \begin{cases} 0, & t < 1 \\ 5, & 1 < t < 2 \\ 0, & t > 2 \end{cases}$$

จงเขียน v_g ในรูปของฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย

คำตอบ: $v_g = 5[u(t - 1) - u(t - 2)]$ V



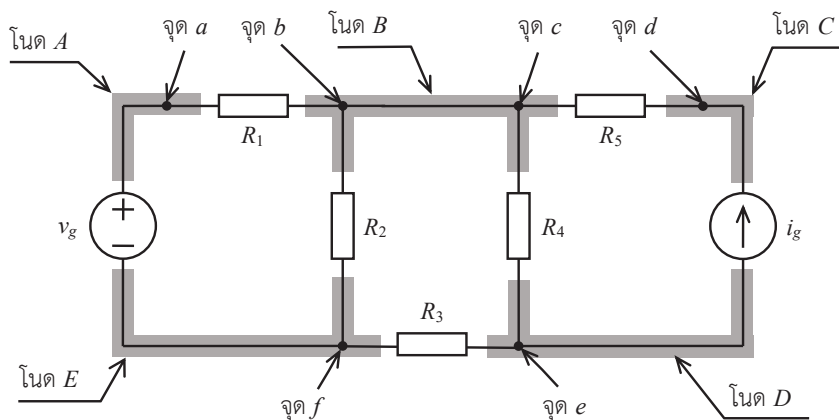
การวิเคราะห์วงจรตัวต้านทาน

(Analysis of Resistive Circuits)

ในบทที่ผ่านมา เราได้ศึกษาหลักการเกี่ยวกับกระแส แรงดัน ความต้านทาน และกำลังที่ตัวต้านทานได้รับ ในบทนี้เราจะนำหลักการเหล่านี้ไปใช้ศึกษาพฤติกรรมของวงจรที่มีตัวต้านทานหลายตัว ดังนั้นนอกจากกฎของโอห์มแล้ว เราจะศึกษากฎกระแสและกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ซึ่งเสนอโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ กุสตาฟ เคอร์ชอฟฟ์ (Gustav Kirchhoff) และเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า รวมทั้งเรียนรู้การแบ่งแรงดัน การแบ่งกระแส และหลักการอื่น ๆ ที่ใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าต่อไป

2.1 กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ต่อเข้าด้วยกัน ในทางปฏิบัติเรานิยามวาดแผนภาพวงจรไฟฟ้าโดยวางตำแหน่งขององค์ประกอบต่าง ๆ รวมทั้งวาดเส้นตรงในแนวนอนหรือแนวตั้งดังรูปที่ 2.1 เส้นตรงในแผนภาพใช้แสดงแทนสายตัวนำที่เชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบและถูกกำหนดให้มีความต้านทานเท่ากับศูนย์เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ตำแหน่งที่องค์ประกอบเชื่อมต่อกันผ่านสายตัวนำเรียกว่า “จุด” (Points) บริเวณที่องค์ประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันเรียกว่า “โนด” (Nodes) ซึ่งประกอบด้วยจุดและเส้นตรง ทั้งนี้ภายในโนด ๆ หนึ่งอาจมีมากกว่า 1 จุดแต่ก็ยกยู่ทุกตำแหน่งภายในโนดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.1 โหนดและจุดในวงจรไฟฟ้า

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current law, KCL) ถูกนำเสนออยู่บนพื้นฐานของแนวคิดที่สืบเนื่องมาจากกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า (Conservation of charge) โดยระบุว่า

“ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์”

ใจความของกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์อาจแสดงได้อีก 2 รูปแบบคือ

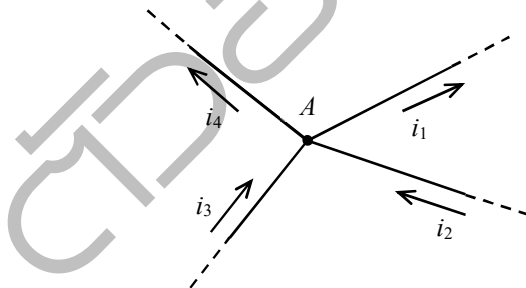
“ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลออกจากโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์”

และ

“ผลบวกของกระแสที่ไหลเข้าโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสที่ไหลออกจากโนดนั้น”

ซึ่งเทียบได้กับการไหลของน้ำในท่อ นั่นคือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่จุดใดจุดหนึ่งภายในท่อต้องเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากจุดนั้น

คำว่า “ผลบวกทางพีชคณิต” (Algebraic sum) หมายความว่าเราต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลที่ใช้อ้างอิงด้วย เช่น กำหนดให้กระแสที่ไหลเข้าโนด ๆ หนึ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก จะได้ว่ากระแสที่ไหลออกจากโนดนั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ อย่างไรก็ตามการแสดงกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ทั้งสามแบบข้างต้นมีนัยเดียวกันและทำให้ได้คำตอบเดียวกันจากการแก้ปัญหาโจทย์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ใช้ว่าจะเลือกใช้แบบใด ลองพิจารณาใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่จุด A ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสร้างสมการกระแสที่โนด A ด้วยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

การใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่ว่า ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโนด ๆ หนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เราสมมติให้กระแสที่ไหลเข้าจุด A มีเครื่องหมายเป็นบวก นั่นหมายความว่ากระแสที่ไหลออกจากจุด A จะมีเครื่องหมายเป็นลบ เราจะได้

$$(-i_1) + (+i_2) + (+i_3) + (-i_4) = 0$$

สำหรับการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในรูปแบบที่ว่า ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลออกจากโนด ๆ หนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เราสมมติให้กระแสที่ไหลออกจากจุด A มีเครื่องหมายเป็นบวก นั่นหมายความว่ากระแสที่ไหลเข้าจุด A จะมีเครื่องหมายเป็นลบ เราได้

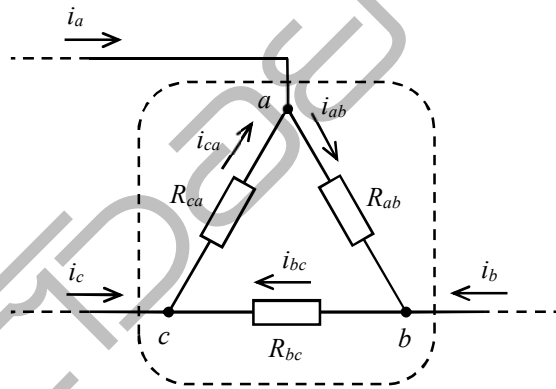
$$(+i_1) + (-i_2) + (-i_3) + (+i_4) = 0$$

ในขณะที่การใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในรูปแบบที่ว่า ผลบวกของกระแสที่ไหลเข้าโนด ๆ หนึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสที่ไหลออกจากโนดนั้น เป็นการหาผลบวกทั่วไปจึงไม่มีการกำหนดเครื่องหมาย เราจะได้

$$i_2 + i_3 = i_1 + i_4$$

หลังจากจัดรูปแต่ละสมการที่ได้จากการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในแต่ละแบบจะพบว่าสมการทั้งสามเป็นสมการเดียวกัน จึงเป็นการยืนยันว่าการแก้ปัญหาโจทย์โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ทั้งสามรูปแบบย่อมทำให้ได้คำตอบเดียวกัน

นอกจากเราจะใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่จุดใดจุดหนึ่งในวงจรได้แล้ว เรายังสามารถประยุกต์ใช้กับส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรได้อีกด้วย ลองพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์กับส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร

โดยเริ่มจากการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่จุด a โดยพิจารณาให้ผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลเข้าจุด a มีค่าเท่ากับผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลออกจากจุด a จะได้

$$i_a + i_{ca} = i_{ab} \quad (2.1)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่จุด b โดยพิจารณาให้ผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลเข้าจุด b มีค่าเท่ากับผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลออกจากจุด b จะได้

$$i_{ab} + i_b = i_{bc}$$

จัดสมการเพื่อหาค่า i_{ab} จะได้

$$i_{ab} = i_{bc} - i_b \quad (2.2)$$

จากนั้นใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่จุด c โดยพิจารณาให้ผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลเข้าจุด c มีค่าเท่ากับผลบวกของปริมาณกระแสที่ไหลออกจากจุด c จะได้

$$i_c + i_{bc} = i_{ca}$$

จัดสมการเพื่อหาค่า i_{ca} จะได้

$$i_{ca} = i_c + i_{bc} \quad (2.3)$$

แทนสมการที่ (2.2) และ (2.3) ในสมการที่ (2.1) และจัดรูป เราได้

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.4)$$

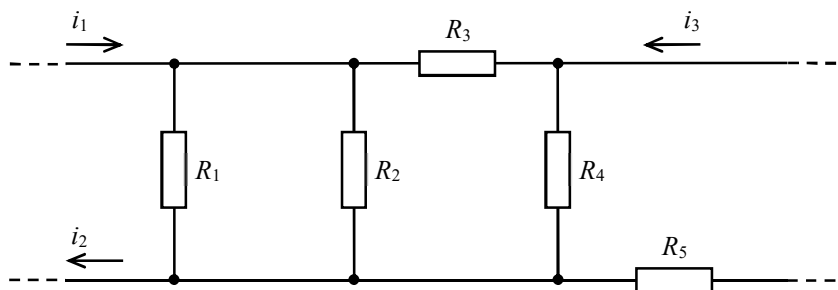
หากเราพิจารณาให้ส่วนของวงจรภายในกรอบเส้นประในรูปที่ 2.3 เป็นเสมือนโนด ๆ หนึ่ง และอาศัยการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์แบบที่ 2 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (2.4) แสดงว่าเราอาจใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์กับส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรโดยพิจารณาให้เป็นเสมือนโนด ๆ หนึ่งได้โดยไม่ต้องทราบค่ากระแสหรือความต้านทานภายในส่วนของวงจรดังกล่าว

ปัญหาที่พบบ่อยในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์คือ เราไม่ทราบทิศทางของกระแสที่ผ่านองค์ประกอบหนึ่ง ๆ วิธีจัดการกับปัญหานี้คือ การสมมติทิศทางกระแสที่ไหลของกระแสนั้นขึ้นมาและใช้อ้างอิงในการคำนวณต่อไป หากค่ากระแสที่คำนวณได้มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ากระแสจริงไหลในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่สมมติขึ้นเอง



ตัวอย่างที่ 2.1

จากรูปที่ 2.4 กำหนดให้ $i_1 = 2$ A, $i_2 = 1$ A และ $i_3 = 1.5$ A จงหาค่ากระแสที่ผ่านตัวต้านทาน R_5



รูปที่ 2.4 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.1

ตำราเล่มนี้อธิบายกฎและทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้า โดยเรียบเรียงเนื้อหาอย่างเป็นลำดับและเป็นเหตุเป็นผล ในแต่ละบท มีตัวอย่างโจทย์ที่แสดงวิธีทำเป็นขั้นตอนซึ่งอธิบายอย่างละเอียด เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย รวมทั้งมีแบบฝึกหัดท้ายบท พร้อมคำตอบให้ผู้อ่านได้ฝึกฝนเพื่อเพิ่มทักษะในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ตำราเล่มนี้ มีเนื้อหาครบถ้วนตามที่ระบุโดยสภาวิศวกรสำหรับ วิชา Electric Circuits ซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มวิชาพื้นฐานทางวิศวกรรม ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกสถาบันการศึกษา เพื่อให้นิสิต นักศึกษามีคุณสมบัติครบถ้วนในการขอรับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมใน แขนงวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง และในแขนงวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร นอกจากนี้ ยังสามารถใช้กับรายวิชาในหลักสูตรอื่นที่เรียนพื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า เช่น วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเคมี และยังเหมาะกับ ผู้ที่ต้องการศึกษาด้วยตนเอง



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จินทรมินทร์

การศึกษา

- ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ปริญญาโท Master of Science in Electrical Engineering,
University of Kassel
- ปริญญาเอก Doctor of Philosophy in Electrical Engineering,
University of Leeds

ปัจจุบัน

- ดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
จังหวัดพิษณุโลก



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House



ISBN 978-616-426-107-5



ราคา 350 บาท