สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1

Electrical Circuit Analysis I

พิมพ์ครั้งที่ 4

นิพัทธ์ จันทรมินทร์

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1

Electrical Circuit Analysis I

พิมพ์ครั้งที่ 4

นิพัทธ์ จันทรมินทร์

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 4.-- พิษณุโลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2568
424 หน้า.
1. การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.3192
ISBN 978-616-426-388-8
ISBN (e-book) 978-616-426-108-2
สพน. 50
ราคา **420** บาท

พิมพ์ครั้งแรก มกราคม พ.ศ. 2561 | พิมพ์ครั้งที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 | พิมพ์ครั้งที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 | พิมพ์ครั้งที่ 4 มิถุนายน พ.ศ. 2568

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.กรองกาญจน์ ชูทิพย์ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
กองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ มดนาค • รองศาสตราจารย ดร.ธนัชสัณห์ พูนไพบูลย์พิพัฒน์ • รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล • รองศาสตราจารย์ ดร.ภณ วชิระนิเวศ • รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เมธีวรัญญู • ศาสตราจารย์ ดร. พญ.สุธาทิพย์ พงษ์เจริญ • ศาสตราจารย์ ดร.สุทิสา ถาน้อย • รองศาสตราจารย์ ดร.นิทรา กิจธีระวุฒิวงษ์ • รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย วิทยาอารีย์กุล • รองศาสตราจารย์ ดร.ชุลีกร ด่านยุทธศิล • ศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี สิงห์น้อย วงศ์วัฒนา • รองศาสตราจารย์ ดร.สุจินดา เจียมศรีพงษ์ • รองศาสตราจารย์วนิดา บำรุงไทย • ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพงษ์ สำเนียง • ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรรยารักษ์ สุวพันธ์ • รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ กิจสนาโยธิน • พัชรี ท้วมใจดี • นวิพรรณ ตันติพลาผล • สรญา แสงเย็นพันธ์
ประสานงาน ภัคคีณี เทิดสิทธิกุล
ฝ่ายขาย/การเงิน มลฑา โพธิ์เงิน • วสันต์ มาสวัสดิ์
ออกแบบปก สรญา แสงเย็นพันธ์
ออกแบบรูปเล่ม สัญญา จันทา
พิมพ์ที่ บริษัท กู๊ดเฮด พริ้นท์ติ้ง แอนด์ แพคเกจจิ้ง กรุ๊ป จำกัด 6/1 นิคมอุตสาหกรรมบางชัน ซอยเสรีไทย 58 แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ

สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย
https://pubat.or.th

พิมพ์บน
กระดาษคุณภาพ เพื่อผลงานคุณภาพ
กระดาษถนอมสายตากรีนรีด

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

@nupress สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

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

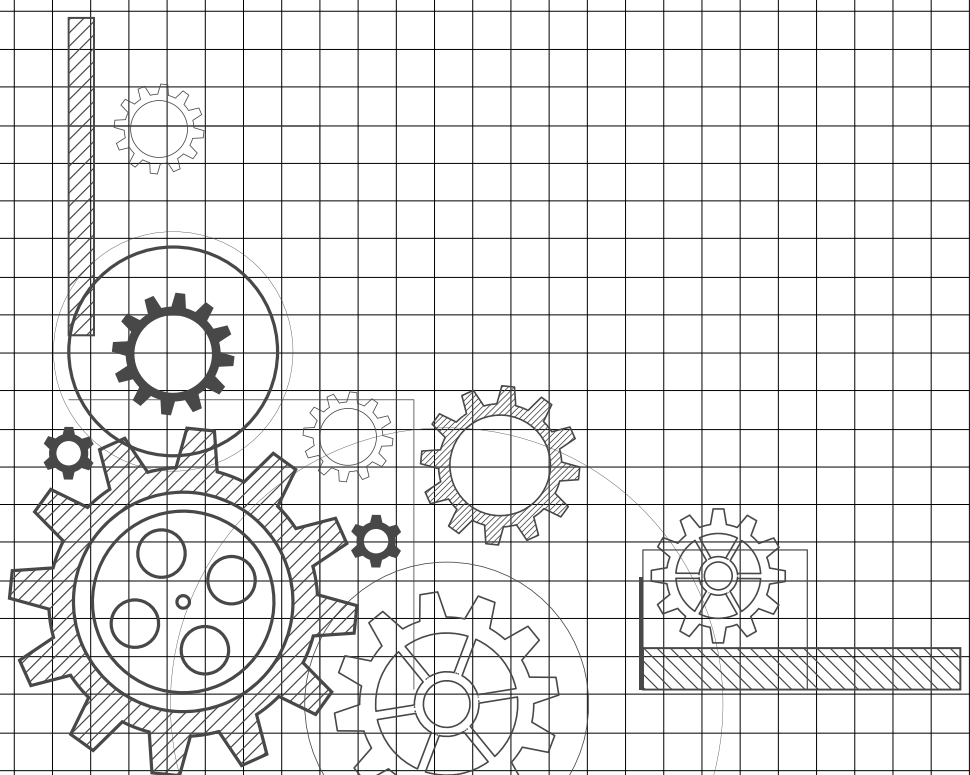
ในบทที่ 1 ได้อธิบายส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้า สัญลักษณ์ขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า เพื่อเขียนแผนภาพวงจร ระบบหน่วยเอสไอ รวมทั้งตัวต้านทานและกฎของโอห์ม ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า หลังจากนั้นในบทที่ 2 ได้อธิบายการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน การแบ่งแรงดันในวงจรอนุกรมและการแบ่งกระแสในวงจรขนาน รวมทั้งการประยุกต์ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ในวิธีแรงดันโนดและวิธีกระแสเมชเพื่อคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร (ค่ากระแสและแรงดัน) ในขณะที่หลักการอื่นที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้านอกเหนือจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ถูกอธิบายในบทที่ 3 อันได้แก่ การแปลงแหล่งกำเนิด การทับซ้อน รวมทั้งทฤษฎีบทของเทเวนินและนอร์ตันและการประยุกต์ใช้สำหรับการถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งเพิ่มความหลากหลายในการเลือกใช้วิธีคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร อย่างไรก็ตามในวงจรไฟฟ้านอกจากตัวต้านทานแล้วอาจมีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำด้วย 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 เพื่อคำนวณค่ากำลังในวงจรที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยเป็นการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเฟสเดียวซึ่งนำไปสู่วิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิดในสถานะอยู่ตัวและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ตลอดจนในบทที่ 9 ที่อธิบายคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีการเชื่อมต่อวงจรทั้งแบบสตาร์และแบบเดลตา และการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลโดยใช้วงจรสมมูลเฟสเดียวรวมทั้งวิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิด

ในเนื้อหาของแต่ละบทมีตัวอย่างการคำนวณพร้อมคำอธิบายและการวิเคราะห์วงจรเพื่อช่วยให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ตอนท้ายของแต่ละบทมีสรุปสาระสำคัญของเนื้อหาและมีแบบฝึกหัดท้ายบทเพื่อให้ผู้อ่านได้ประมวลความรู้ความเข้าใจรวมทั้งฝึกฝนการแก้ปัญหาโจทย์เพื่อให้เกิดทักษะในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ผู้เขียนหวังว่าตำราเล่มนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าให้กับนิสิตที่เรียนในรายวิชาดังกล่าวรวมทั้งบุคคลอื่นที่สนใจซึ่งสามารถอ่านและทำความเข้าใจในสาระของตำราเล่มนี้ได้ด้วยตนเอง

นิพัทธ์ จันทรมินทร์
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 กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ 35
2.2 กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ 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..... 406
ดรรชนี..... 407

บทที่ 1

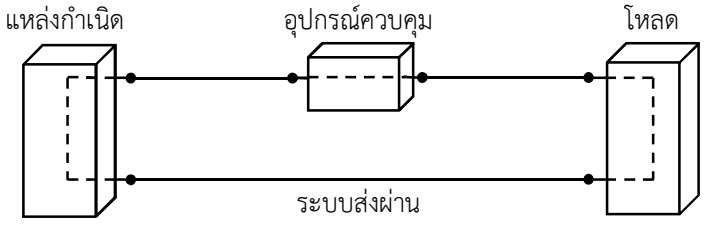
องค์ประกอบและปริมาณในวงจรไฟฟ้า

(Electrical Circuit Elements and Quantities)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า ผู้ที่เริ่มศึกษาวงจรไฟฟ้าควรทราบนิยามของวงจรไฟฟ้า ความหมายของการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า และหน่วยที่ใช้เป็นมาตรฐานในการวัดค่าปริมาณดังกล่าว การเชื่อมกันขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าทำให้สามารถหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าในวงจรได้โดยแก้สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของปริมาณที่วัดค่าได้เหล่านั้น ดังนั้นความเข้าใจในการทำงานขององค์ประกอบแต่ละประเภทซึ่งทำให้ทราบเงื่อนไขของปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

1.1 องค์ประกอบวงจร

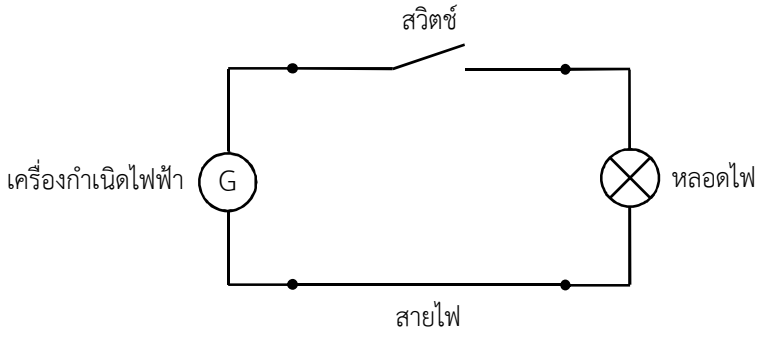
ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนดังรูปที่ 1.1 ส่วนที่ 1 คือแหล่งกำเนิด (Source) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซลล์สุริยะ แบตเตอรี่ มีหน้าที่ผลิตและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่ 2 คือ โหลด (Load) ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการใช้พลังงานที่ได้รับจากแหล่งกำเนิด อุปกรณ์ส่วนใหญ่ภายในบ้านเรือนจัดเป็นโหลด เช่น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



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้า

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

พิจารณาระบบไฟฟ้าอย่างง่าย เช่น ระบบไฟส่องสว่างที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายพลังงานให้กับหลอดไฟโดยมีสวิตช์เพื่อเปิดและปิดไฟ รายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบมักถูกแทนด้วยสัญลักษณ์เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจมากขึ้นและวาดเป็นแผนภาพวงจรไฟฟ้า (Electrical circuit diagram) ได้ดังรูปที่ 1.2 เพื่อแสดงการไหลของพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด 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)

บทที่ 2

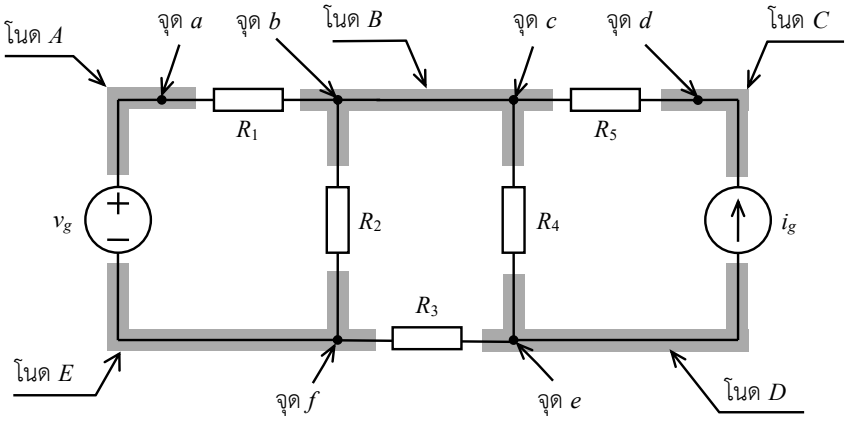
การวิเคราะห์วงจรตัวต้านทาน

(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 ในทางปฏิบัติเรานิยมวาดแผนภาพวงจรไฟฟ้าโดยวางตำแหน่งขององค์ประกอบต่าง ๆ รวมทั้งวาดเส้นตรงในแนวนอนหรือแนวตั้งดังรูปที่ 2.1 เส้นตรงในแผนภาพใช้แสดงแทนสายตัวนำที่เชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบและถูกกำหนดให้มีความต้านทานเท่ากับศูนย์เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ตำแหน่งที่องค์ประกอบเชื่อมต่อกันผ่านสายตัวนำเรียกว่า “จุด” (Points) บริเวณที่องค์ประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันเรียกว่า “โนด” (Nodes) ซึ่งประกอบด้วยจุดและเส้นตรง ทั้งนี้ภายในโนด ๆ หนึ่งอาจมีมากกว่า 1 จุดแต่ศักย์ทุกตำแหน่งภายในโนดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.1 โนดและจุดในวงจรไฟฟ้า

บทที่ 3

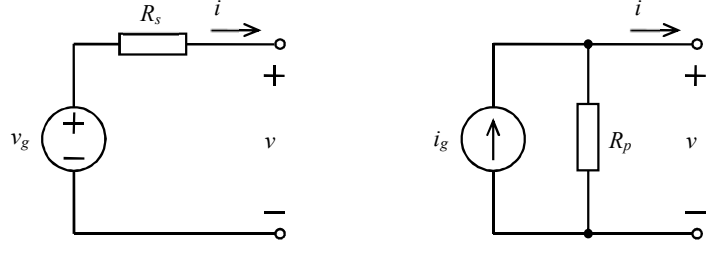
ทฤษฎีบทวงจรไฟฟ้า

(Circuit Theorems)

แม้ว่าเราสามารถวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีแรงดันโนดและวิธีกระแสเมช ร่วมกับกฎของโอห์ม การหาค่าความต้านทานสมมูล การแบ่งแรงดัน และการแบ่งกระแส อย่างไรก็ดี ในวงจรที่ซับซ้อน เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีองค์ประกอบจำนวนมาก การลดรูปของวงจรที่ซับซ้อนจะลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ได้ ในบทนี้เราจะศึกษาการแปลงแหล่งกำเนิดเพื่อเปลี่ยนรูประหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันกับแหล่งกำเนิดกระแส การใช้สมบัติการทับซ้อนของวงจรเชิงเส้นเพื่อหาค่ากระแสและแรงดันที่เกิดจากแต่ละแหล่งกำเนิดในวงจร การลดรูปวงจรโดยใช้ทฤษฎีบทของเทเวนินและทฤษฎีบทของนอร์ตันเมื่อต้องการหาค่าแรงดันหรือกระแสขององค์ประกอบเพียง 1 องค์ประกอบในวงจร และการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโหลดกับความต้านทานที่เป็นตัวแทนของส่วนที่เหลือในวงจรเพื่อให้โหลดได้รับกำลังสูงสุด

3.1 การแปลงแหล่งกำเนิด

ในทางปฏิบัติแรงดันด้านออกของแหล่งกำเนิดแรงดันมีค่าลดลงเมื่อแหล่งกำเนิดส่งกำลังมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองของแหล่งกำเนิดแรงดันของจริงจึงประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันอุดมคติที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน เราใช้ตัวต้านทานนี้จำลองความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแหล่งกำเนิดแรงดัน ในทำนองเดียวกันเราใช้ตัวต้านทานต่อขนานกับแหล่งกำเนิดกระแสอุดมคติเพื่อจำลองความสูญเสียในแหล่งกำเนิดกระแสของจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เราสามารถใช้การแปลงแหล่งกำเนิด (Source transformation) เพื่อเปลี่ยนรูประหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานกับแหล่งกำเนิดกระแสที่ต่อขนานกับตัวต้านทานโดยไม่ทำให้กระแสและแรงดันขององค์ประกอบต่าง ๆ ในวงจรเปลี่ยนแปลง



(ก) แหล่งกำเนิดแรงดัน (ข) แหล่งกำเนิดกระแส

รูปที่ 3.1 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดของจริง

บทที่ 4

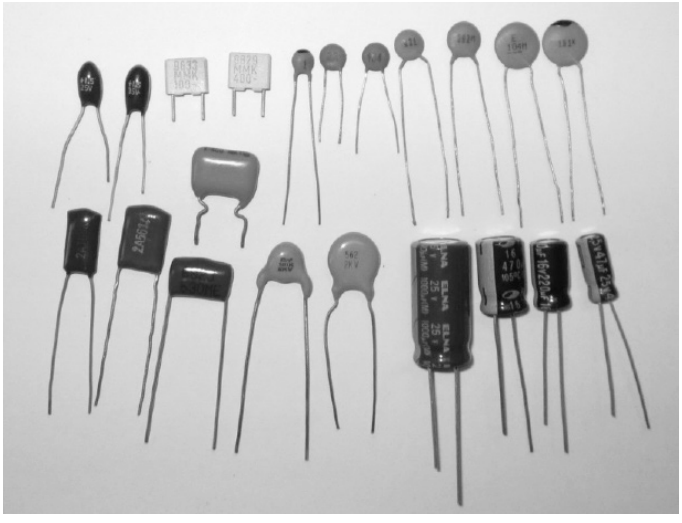
ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

(Capacitors and Inductors)

ในบทที่ผ่าน ๆ มาเราศึกษาเฉพาะวงจรตัวต้านทานซึ่งเกี่ยวข้องกับสมการพีชคณิต ในบทนี้เราจะได้ศึกษาคุณสมบัติขององค์ประกอบสะสมพลังงาน 2 ชนิดในวงจรไฟฟ้า นั่นคือตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในงานด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดยมีลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถสะสมพลังงานได้และสามารถปล่อยพลังงานที่สะสมไว้ออกมาได้ในภายหลัง การนำตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมาต่อใช้งานร่วมกับตัวต้านทานทำให้เกิดวงจรไฟฟ้าที่มีประโยชน์ วงจรดังกล่าวมักมีสวิตช์เป็นส่วนประกอบและการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์จะส่งผลต่อพฤติกรรมของวงจร

4.1 ตัวเก็บประจุและความจุ

ในปัจจุบันตัวเก็บประจุถูกนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับปล่อยแสงแฟลชในกล้องถ่ายรูป การปรับสัญญาณในระบบวิทยุและโทรทัศน์ การลดสัญญาณรบกวนในวงจรไฟฟ้า การเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ปั๊ม การคุมค่าแรงดันและการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานทั่วไป

บทที่ 5

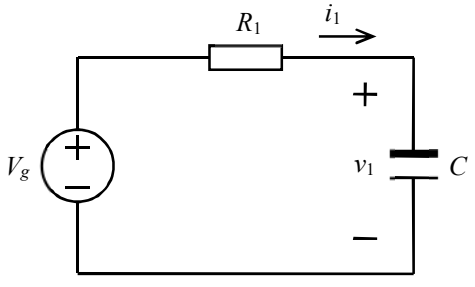
วงจรอันดับหนึ่ง

(First-Order Circuits)

พฤติกรรมของวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) โดยทั่วไปการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ยากกว่าการแก้สมการพีชคณิต ซึ่งโดยส่วนใหญ่อันดับของสมการเชิงอนุพันธ์จะเท่ากับจำนวนองค์ประกอบสะสมพลังงานในวงจร นั่นคือ จำนวนตัวเก็บประจุรวมกับจำนวนตัวเหนี่ยวนำ และการใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์กับวงจรที่มีตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำ หรือมีตัวเหนี่ยวนำเพียงตัวเดียวโดยไม่มีตัวเก็บประจุนั้น จะทำให้เราได้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First-order differential equation) เราจึงเรียกวงจรเหล่านี้ว่า “วงจรอันดับหนึ่ง” (First-order circuits) ในที่นี้หากเป็นวงจรอันดับหนึ่งที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุจะเรียกว่า “วงจร RC” และหากเป็นวงจรอันดับหนึ่งที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำจะเรียกว่า “วงจร RL”

5.1 วงจร RC ที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อเรานำแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่เท่ากับ V_g มาเชื่อมต่อกับตัวต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C ดังรูปที่ 5.1 โดยไม่มีพลังงานถูกสะสมในตัวเก็บประจุที่เวลา $t = 0$ นั่นคือ $v_1(0) = 0$ จะเกิดกระแส i_1 ไหลเข้าตัวเก็บประจุซึ่งทำให้แรงดัน v_1 มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 วงจร RC ที่มีแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง

เราสามารถหาค่า v_1 และ i_1 โดยเริ่มจากการใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์รอบวงจร จะได้

$$-V_g + R_1 i_1 + v_1 = 0$$

บทที่ 6

วงจรอันดับสอง

(Second-Order Circuits)

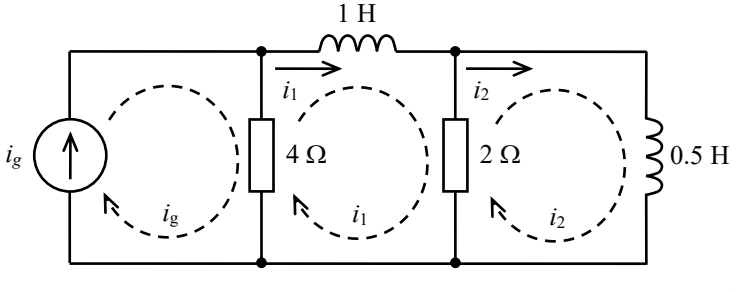
ความจุและความเหนี่ยวนำมีอยู่ทั่วไปในระบบไฟฟ้าใด ๆ การหาผลตอบสนองในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมของวงจรและสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ เราได้เรียนรู้จากบทที่ผ่านมาว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์ และเราหาผลตอบสนองได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ผลตอบสนองบริบูรณ์ประกอบด้วยผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองแบบบังคับ ดังนั้นการหาผลตอบสนองบริบูรณ์ในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจึงเป็นประเด็นสำคัญที่เราจะศึกษาในบทนี้

6.1 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง

โดยทั่วไปในวงจรที่มีองค์ประกอบสะสมพลังงานสองตัว ไม่ว่าจะเป็นวงจรที่มีตัวเก็บประจุสองตัว วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัว หรือวงจรที่มีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอย่างละหนึ่งตัว เราสามารถสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันของตัวเก็บประจุหรือของกระแสของตัวเหนี่ยวนำโดยอาศัยกฎกระแสและกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ร่วมกับการใช้กฎของโอห์มรวมทั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวเก็บประจุและของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างที่ 6.1

พิจารณาวงจรในรูปที่ 6.1 จงหาสมการเชิงอนุพันธ์ของ i_1 โดยใช้วิธีกระแสเมช



รูปที่ 6.1 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 6.1

บทที่ 7

การวิเคราะห์สถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์

(Sinusoidal Steady-State Analysis)

ในบทที่ 5 และ 6 เราได้ศึกษาผลตอบสนองในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ผลตอบสนองธรรมชาติหาได้จากวงจรที่ไม่มีแหล่งกำเนิดปรากฏอยู่ จึงไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดที่กระตุ้นวงจร ในขณะที่ผลตอบสนองแบบบังคับจะขึ้นอยู่กับชนิดของการกระตุ้นวงจร เช่น ในกรณีของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ผลตอบสนองแบบบังคับจะเป็นค่าคงตัว หนึ่งในสัญญาณกระตุ้นที่สำคัญที่สุดในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคือสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal signal) ซึ่งเป็นสัญญาณที่พบมากที่สุดในงานวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่งานวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารใช้เป็นสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) ในกรณีที่ใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ เราอาจเรียกผลตอบสนองธรรมชาติว่า ผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient response) และเรียกผลตอบสนองแบบบังคับว่า ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (Steady-state response)

ในบทนี้เราจะศึกษาวงจรที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ เนื่องจากผลตอบสนองธรรมชาติไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดและสามารถหาได้ด้วยวิธีการที่อธิบายในบทที่ผ่านมา ดังนั้นเป้าหมายของเราคือการหาผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งเป็นผลตอบสนองแบบบังคับและมีค่าเหลืออยู่หลังจากผลตอบสนองชั่วครู่กลายเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง

7.1 คุณสมบัติของสัญญาณรูปไซน์และเฟสเซอร์

สัญญาณแรงดัน $v(t)$ ที่เป็นสัญญาณรูปไซน์แสดงได้ดังรูปที่ 7.1 เราสามารถเขียนอธิบายฟังก์ชันไซน์ (Sinusoidal function) ของ $v(t)$ ได้ดังนี้

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

โดยที่ V_m เป็นแอมพลิจูด (Amplitude) ของ $v(t)$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของสัญญาณ และ ω คือความถี่เชิงมุม (Angular frequency) ซึ่งบ่งบอกถึงความเร็วในการแกว่งของสัญญาณ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

เนื่องจากสัญญาณรูปไซน์มีฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodic function) ซึ่งเราสามารถเขียนได้ว่า

$$v(t+T) = v(t)$$

บทที่ 8

กำลังในสถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์

(Sinusoidal Steady-State Power)

สืบเนื่องจากการเรียนรู้วิธีหาผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวของแรงดันและกระแสในวงจรที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ผลคูณของค่าแรงดันกับกระแสที่ได้ย่อมให้ผลลัพธ์เป็นค่ากำลังในสถานะอยู่ตัว กำลังในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งให้กับโหลดที่เป็นตัวต้านทานจะสูญเสียเป็นความร้อนเช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในกรณีของโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ กำลังถูกส่งกลับไปกลับมาระหว่างแหล่งกำเนิดกับโหลด ในบทนี้เราจะได้เรียนรู้ชนิดของกำลังและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแต่ละชนิดในวงจรที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับโหลดแต่ละชนิดและผลของการใช้กำลังที่มีต่อจำนวนเงินที่ต้องชำระค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน โดยยังคงอาศัยหลักการของเฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์ที่ได้เรียนรู้ในบทที่ผ่านมา

8.1 กำลังขณะหนึ่ง

ในกรณีที่แรงดันและกระแสเป็นฟังก์ชันของเวลา ผลคูณของแรงดันกับกระแสดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า “กำลังขณะหนึ่ง” (Instantaneous power) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาเช่นกัน และบ่งบอกถึงอัตราการจ่ายหรือดูดกลืนพลังงานขององค์ประกอบใด ๆ เรานิยมใช้ค่าสูงสุดหรือค่ายอดของกำลังขณะหนึ่งเพื่อกำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ถ้าวงจรขยายอิเล็กทรอนิกส์ได้รับสัญญาณเข้าที่มีค่ากำลังสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด แล้วสัญญาณออกจะเพี้ยน และวงจรอาจเสียหายได้หากรับกำลังที่สูงเกินนี้เป็นระยะเวลานาน

กำหนดให้แรงดันและกระแสในสถานะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad \text{และ} \quad i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

เราคำนวณค่ากำลังขณะหนึ่งได้จาก

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v)\cos(\omega t + \theta_i)$$

และเมื่อประยุกต์ใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2}\left[\cos(A+B) + \cos(A-B)\right]$$

เราจะได้

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2}\left[\cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) + \cos(\theta_v - \theta_i)\right] \tag{8.1}$$

บทที่ 9

วงจรสามเฟส

(Three-Phase Circuits)

ในวงจรเฟสเดียว (Single-phase circuit) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแรงดันรูปไซน์ 1 แหล่งดังที่ได้ศึกษาในบทที่ 8 กำลังขณะหนึ่งที่จ่ายให้โหลดมีลักษณะกระเพื่อม การผลิตและการส่งผ่านกำลังในวงจรหลายเฟส (Polyphase circuit) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแรงดันรูปไซน์มากกว่า 1 แหล่งมีข้อดีเหนือกว่าวงจรเฟสเดียว ชนิดของวงจรหลายเฟสที่นิยมใช้มากที่สุดคือ “วงจรสามเฟส” (Three-phase circuit) กำลังที่ส่งผ่านในวงจรสามเฟสมีค่าคงที่ มอเตอร์สามเฟสจึงมีสมรรถนะในการทำงานดีกว่ามอเตอร์เฟสเดียว และมีการสึกหรอของชิ้นส่วนทางกลน้อยกว่า นอกจากนี้อุปกรณ์ในระบบสามเฟสยังมีน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเฟสเดียวที่ส่งจ่ายกำลังเท่ากัน ในทางปฏิบัติแหล่งกำเนิดของวงจรสามเฟสนิยมสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขดลวดที่สเตเตอร์ 3 ชุด และมีขดลวดที่โรเตอร์เพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็ก การหมุนของโรเตอร์ทำให้สนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวดที่สเตเตอร์และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดแต่ละชุด ซึ่งเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมเฟสห่างกัน 120°

9.1 วงจรสามเฟสสมดุล

แหล่งกำเนิดในวงจรสามเฟสสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์ 3 สัญญาณที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมเฟสห่างกัน 120° ซึ่งเรียกว่า “แรงดันสามเฟสสมดุล” (Balanced three-phase voltages) ดังนั้นแหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสจึงคล้ายกับการต่อแหล่งกำเนิดแรงดันรูปไซน์จำนวน 3 แหล่งที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมเฟสห่างกัน 120° ดังตัวอย่างในรูปที่ 9.1
โดยที่

$$e_{AA1} = 311\cos 314t \text{ V}$$
$$e_{BB1} = 311\cos(314t - 120^\circ) \text{ V}$$
$$e_{CC1} = 311\cos(314t - 240^\circ) = 311\cos(314t + 120^\circ) \text{ V}$$

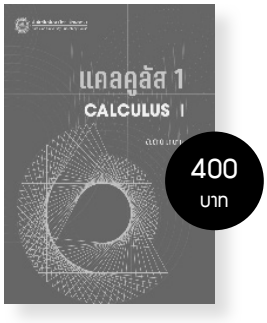
และกำหนดให้ e_{AA1} เป็นแรงดันเฟสแรก e_{BB1} เป็นแรงดันเฟสที่สอง และ e_{CC1} เป็นแรงดันเฟสที่สาม ซึ่งกราฟแรงดันทั้งสามแสดงได้ดังรูปที่ 9.2

หนังสือแนะนำ

แคลคูลัส 2 Calculus II

ผู้แต่ง : รศ. ดร.ชัยรัตน์ มดนาค

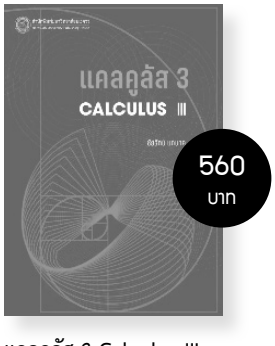
แคลคูลัส 2 (Calculus II) เป็นเนื้อหาส่วนที่สองของกลุ่มแคลคูลัสที่มี การเพิ่มเติมพีชคณิตเชิงเส้นที่เป็นประโยชน์กับบางสาขาของวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งประกอบไปด้วยเรื่องลำดับและอนุกรมและการตรวจสอบความลู่เข้า โดยแบ่งเนื้อหาในส่วนนี้เป็นการหาลิมิตของลำดับเพื่อตรวจสอบการลู่เข้า การพิจารณาความลู่เข้าของอนุกรมโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้การเปรียบเทียบ ลิมิตและการเปรียบเทียบ การใช้ปริพันธ์ การใช้อัตราส่วน และการใช้วิธีค่ารากสำหรับเนื้อหาในส่วนที่สองได้แนะนำนิยามของเมทริกซ์ การดำเนินการของเมทริกซ์ และการประยุกต์ใช้เมทริกซ์ เช่น การหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงเส้นโดยใช้เมทริกซ์ เป็นต้น และเนื้อหาส่วนสุดท้ายของหนังสือเล่มนี้เป็นเรื่องปริภูมิเวกเตอร์ ซึ่งมีเนื้อหาครอบคลุม การตรวจสอบ ปริภูมิย่อย การหาฐานและมิติ และการหาค่าลักษณะเฉพาะและเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ หนังสือเล่มนี้ได้นำเสนอการทดสอบลำดับและอนุกรม และหลักการทางพีชคณิตที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการต่อยอดสำหรับศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ และอื่น ๆ อีกทั้งสามารถเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับ การทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบสมการเชิงเส้นได้อีกด้วย



แคลคูลัส 1 Calculus I

ผู้แต่ง : รศ. ดร.ชัยรัตน์ มดนาค

แคลคูลัสโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน คือ แคลคูลัส 1 แคลคูลัส 2 และแคลคูลัส สำหรับหนังสือแคลคูลัส 1 เนื้อหาจะประกอบไปด้วย พื้นฐานการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลักการอุปนัย เชิงคณิตศาสตร์ การหาลิมิตของฟังก์ชัน การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันและการประยุกต์ การหาปริพันธ์ของฟังก์ชันและการประยุกต์ และเทคนิคในการหาปริพันธ์ เป็นต้น เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้เป็นเนื้อหาของแคลคูลัสในส่วนแรก ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อการต่อยอด ในแคลคูลัสระดับสูง ดังนั้น หนังสือเล่มนี้จึงนำเสนอตัวอย่าง บทนิยาม และทฤษฎีบทอย่างละเอียดและง่ายต่อการเข้าใจในทุกขั้นตอน มีการแทรกความรู้พื้นฐานต่าง ๆ ทางคณิตศาสตร์ที่จำเป็น เพื่อทำให้การแก้ปัญหาบรรลุสู่เป้าหมาย เหมาะสมกับทุกคนที่ต้องใช้ความรู้พื้นฐานทางแคลคูลัสในการเรียนการสอน ประกอบอาชีพ หรือเสริมความรู้เพิ่มเติม



แคลคูลัส 3 Calculus III

ผู้แต่ง : รศ. ดร.ชัยรัตน์ มดนาค

แคลคูลัส 3 (Calculus III) เป็นเนื้อหาขั้นตอนสุดท้ายของแคลคูลัส หนังสือ เล่มนี้แบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่งและอันดับสูง การใช้ผลการแปลงลาปลาซและลาปลาซผกผันสำหรับการหาผลเฉลย ของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับส่วนที่สองเป็นการหาอนุพันธ์และปริพันธ์ของฟังก์ชัน หลายตัวแปรและแคลคูลัสของเวกเตอร์ เช่น ปริพันธ์ตามผิวและทฤษฎีบทของเกาส์และสโตกส์ เป็นต้น ทฤษฎีบทและตัวอย่างในหนังสือเล่มนี้ มีความละเอียดสูงและชัดเจน ซึ่งเหมาะสมกับผู้ที่มีความสนใจแคลคูลัสในทุกระดับ ทุกอาชีพ โดยเฉพาะผู้ที่ต้องการคำปรึกษา ทางด้านแคลคูลัสสามารถศึกษาและเข้าใจได้ด้วยตนเอง

0 5596 8833-8836 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร nuph@nu.ac.th

NUPH online store
www.nupress.grad.nu.ac.th

สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

สั่งซื้อหนังสือออนไลน์

จัดส่งถึงบ้านสะดวกรวดเร็ว

สั่งซื้อทันที

กรณีต้องการสั่งซื้อหนังสือปริมาณมาก หรือเข้าชั้นเรียนติดต่อได้ที่
ฝ่ายจัดจำหน่ายสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

nuph@nu.ac.th
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
0 5596 8833-8836
nu_publishing

NUPH
online store
www.nupress.grad.nu.ac.th

ตำราเล่มนี้อธิบายกฎและทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าโดยเรียบเรียงเนื้อหาอย่างเป็นลำดับและเป็นเหตุเป็นผล ในแต่ละบทมีตัวอย่างโจทย์ที่แสดงวิธีทำเป็นขั้นตอน ซึ่งอธิบายอย่างละเอียดเพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย รวมทั้งมีแบบฝึกหัดท้ายบทพร้อมคำตอบให้ผู้อ่านได้ฝึกฝนเพื่อเพิ่มทักษะในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

ตำราเล่มนี้มีเนื้อหาครบถ้วนตามที่ระบุโดยสภาวิศวกรสำหรับวิชา Electric Circuits ซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มวิชาพื้นฐานทางวิศวกรรมในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าของคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกสถาบันการศึกษา เพื่อให้นิสิตและนักศึกษามีคุณสมบัติครบถ้วนในการขอรับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมในแขนงวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง และในแขนงวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร นอกจากนี้ ยังสามารถใช้กับรายวิชาในหลักสูตรอื่นที่เรียนพื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า เช่น วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเคมีและยังเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาด้วยตนเอง

รองศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์

การศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาโท Master of Science in Electrical Engineering
University of Kassel, Germany

ปริญญาเอก Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
University of Leeds, United Kingdom

ปัจจุบัน

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House

ISBN 978-616-426-388-8

ราคา 420 บาท

https://www.nupress.grad.nu.ac.th