

# การวิเคราะห์ วงจรไฟฟ้า 1

Electrical Circuit Analysis I

นิพัทธ์ วัชรนิรันดร์

ตัวอย่าง



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร  
Naresuan University Publishing House  
[www.nupress.grad.nu.ac.th](http://www.nupress.grad.nu.ac.th)

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ  
National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

นิพิตร์ จันทรมินทร์.

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1= Electrical Circuit Analysis I.- พิชญ์โลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2561  
422 หน้า.

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

621.3192

ISBN 978-616-426-107-5

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

สพท. 50

ราคา 350 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2561 จำนวนพิมพ์ 300 เล่ม



สงวนลิขสิทธิ์ ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร ห้ามการลอกเลียนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้  
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร เท่านั้น

ผู้จัดพิมพ์ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

- มีวางจำหน่ายที่
- ศูนย์หนังสือแห่งกลางกรมมหาวิทยาลัย** อาคารวิทยกิตติ์ ชั้น 14 ซอยจุฬาลงกรณ์ 64 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
สาขา ศาลาพระแก้ว กรุงเทพฯ โทร. 0-2218-7000-3  
สยามสแควร์ อาคารวิทยกิตติ์ กรุงเทพฯ โทร. 0-2218-9881, 0-2255-4433  
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-5  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โทร. 044-216131-2  
มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (ร.จปร.) จังหวัดนครนายก โทร. 037-393-023, 037-393-036  
จัดสรรจามจุรี กรุงเทพฯ โทร. 0-2160-5301  
มหาวิทยาลัยพะเยา โทร. 0-5446-6799, 0-5446-6800  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โทร. 044-922662-3  
สาขาย่อยคณะครุศาสตร์จุฬาลงกรณ์ โทร. 0-2218-3979  
สาขาหัวหมาก โทร. 02-374-1378
  - ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** อาคารวิทยบริการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0-2579-0113
  - ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์** อาคารเอกประสงค์ ชั้น 1 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ถนนพระจันทร์ แขวงพระบรมมหาราชวัง เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200 โทร. 0-2613-3899, 0-2623-6493  
สาขา ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ โทร. 0-5394-4990-1  
ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา โทร. 0-7428-2980, 0-74282981  
ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา โทร. 0-7329-9980
  - ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยขอนแก่น** 123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000 โทร. 0-4320-2842
  - ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยมหาสารคาม** 41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150 โทร. 0-4375-4319

กองบรรณาธิการ กองบรรณาธิการจัดทำเอกสารสิ่งพิมพ์ทางวิชาการของสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ออกแบบปก สรญา แสงเย็นพันธ์  
ภาพหน้าปก สัณญา จันทรา  
พิมพ์ที่ ร้านพิชญ์โลกดอทคอม 999/2-3 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 โทร. 055-303132



สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์  
และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย  
<http://www.thalbooksociety.com>

กรณีต้องการสั่งซื้อหนังสือปริมาณมาก หรือเข้าชั้นเรียนติดต่อได้ที่  
ฝ่ายจัดจำหน่ายสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

✉ [nuph@nu.ac.th](mailto:nuph@nu.ac.th)    สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร  
☎ 0 5596 8833-8836    [nu\\_publishing](https://twitter.com/nu_publishing)





# ค่านำ

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 รวมทั้งการประยุกต์ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ในวิธีแรงดันโหนดและวิธีกระแสเมฆเพื่อคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร (ค่ากระแสและแรงดัน) ในขณะที่หลักการอื่นที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้า นอกเหนือจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ถูกอธิบายในบทที่ 3 อันได้แก่ การแปลงแหล่งกำเนิด การทับซ้อน รวมทั้งทฤษฎีบทของเทเวนิชและนอร์ตันและการประยุกต์ใช้สำหรับการถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งเพิ่มความหลากหลายในการเลือกใช้วิธีคำนวณหาผลตอบสนองในวงจร อย่างไรก็ตามในวงจรไฟฟ้า นอกจากตัวต้านทานแล้วอาจมีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำด้วย ดังนั้นในบทที่ 4 จึงอธิบายคุณลักษณะของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ความต่อเนื่องของค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและความต่อเนื่องของค่ากระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ จากนั้นในบทที่ 5 จึงอธิบายหลักการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่มีตัวเก็บประจุ 1 ตัวหรือมีตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัวต่อรวมอยู่กับตัวต้านทานซึ่งเรียกว่าวงจรอันดับหนึ่ง ชนิดและคุณลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในวงจร รวมทั้งแสดงให้เห็นประโยชน์ของการประยุกต์ใช้ผลการแปลงลาปลาซเพื่อหาผลตอบสนองในวงจร และในบทที่ 6 อธิบายหลักการวิเคราะห์วงจรอันดับสอง ซึ่งมักประกอบด้วยตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำรวมกัน 2 ตัวต่อรวมอยู่กับตัวต้านทาน การหาสมการลักษณะเฉพาะ และแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ผลการแปลงลาปลาซเพื่อหาผลตอบสนองในวงจร ตามด้วยบทที่ 7 ที่เน้นการหาผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวของวงจรที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยใช้หลักการของเฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์ซึ่งลดความยุ่งยากในการหาคำตอบได้อย่าง

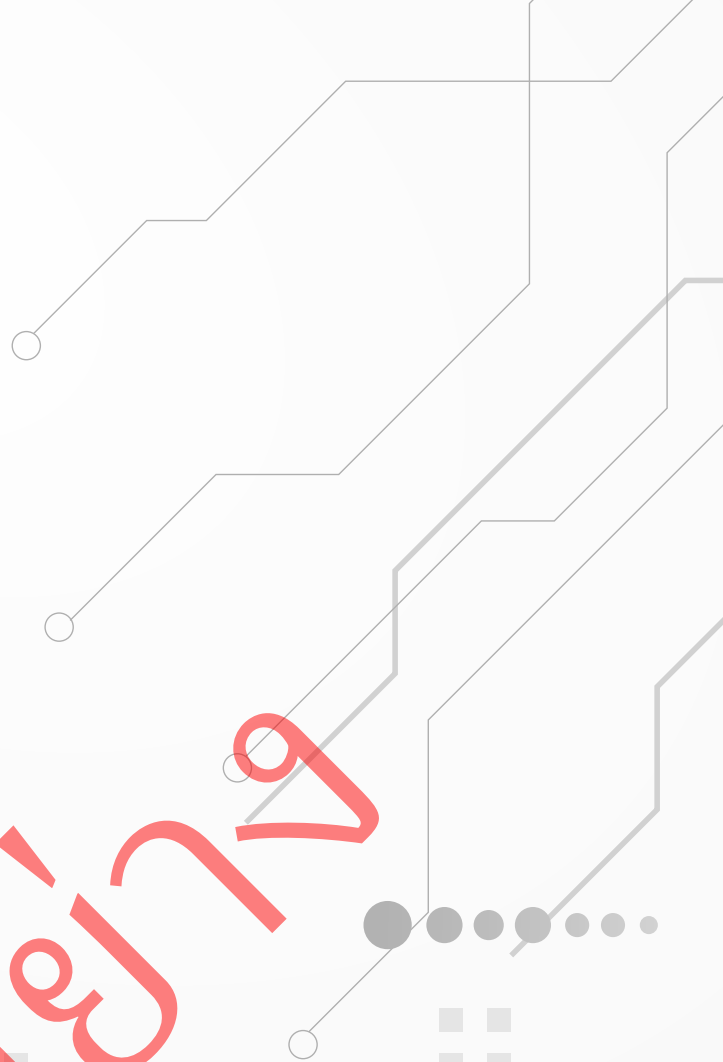
มากโดยเฉพาะในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำหลายตัว นอกจากนี้ยังนำหลักการของ เฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์มาใช้งานอย่างต่อเนื่องในบทที่ 8 เพื่อคำนวณค่ากำลังในวงจรที่มีสัญญาณเข้าเป็น สัญญาณรูปไซน์โดยเป็นการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าเฟสเดียวซึ่งนำไปสู่วิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิดในสถานะอยู่ตัว และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ตลอดจนในบทที่ 9 ที่อธิบายคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีการเชื่อมต่อวงจรทั้งแบบสตาร์และแบบเดลตา และการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลโดยใช้วงจรสมมูล เฟสเดียวรวมทั้งวิธีหาค่ากำลังแต่ละชนิด

ในเนื้อหาของแต่ละบทมีตัวอย่างการคำนวณพร้อมคำอธิบายและการวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อช่วยให้ ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ตอนท้ายของแต่ละบทมีสรุปสาระสำคัญของเนื้อหาและมีแบบฝึกหัดท้ายบท เพื่อให้ผู้อ่านได้ประมวลความรู้ความเข้าใจรวมทั้งฝึกฝนการแก้ปัญหาโจทย์เพื่อให้เกิดทักษะในการวิเคราะห์ ห้วงจรไฟฟ้า ผู้เขียนหวังว่าตำราเล่มนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้า ให้กับนิสิตที่เรียนในรายวิชาดังกล่าวรวมทั้งบุคคลอื่นที่สนใจซึ่งสามารถอ่านและทำความเข้าใจในสาระของ ตำราเล่มนี้ได้ด้วยตนเอง

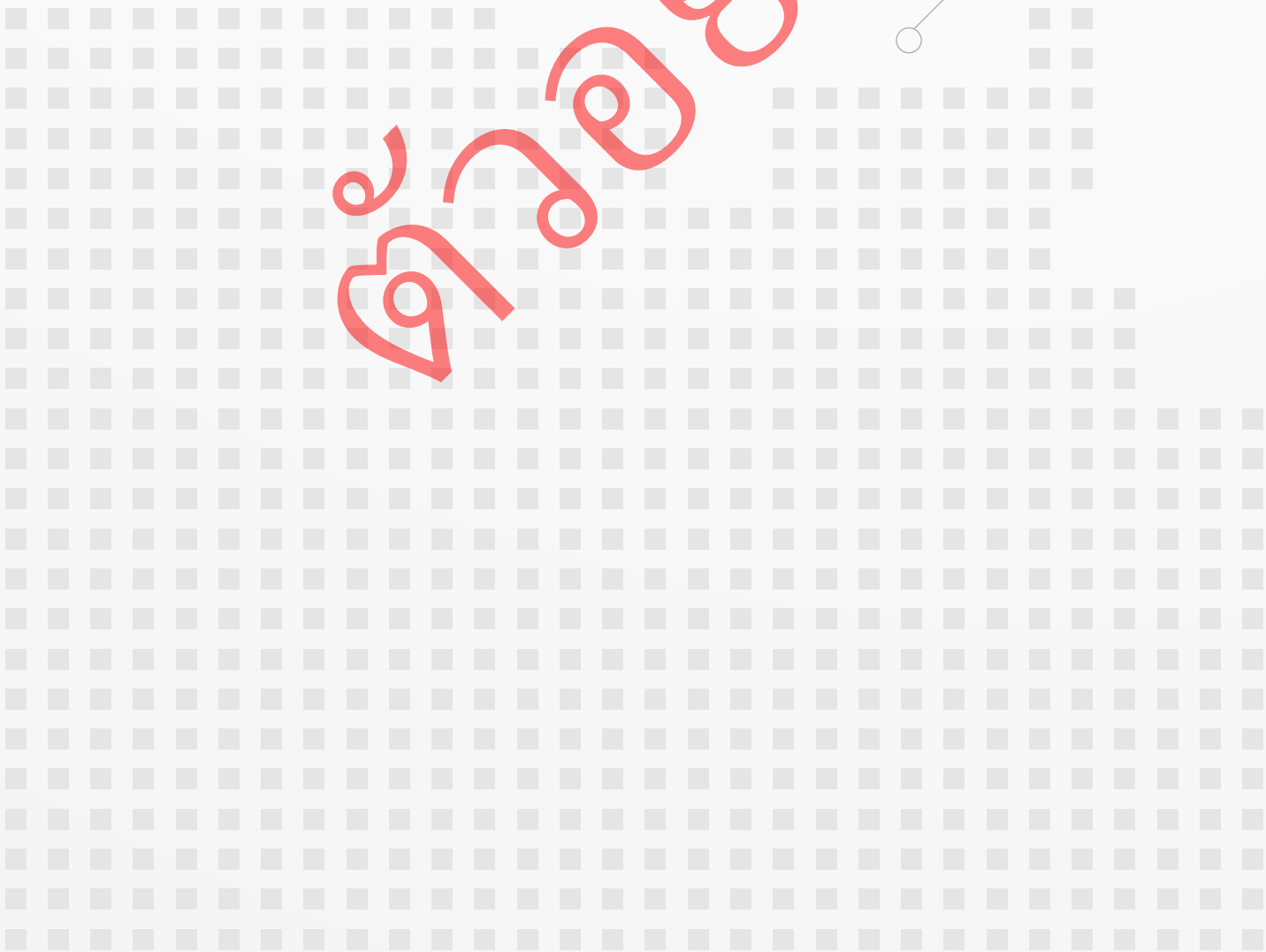
นิพัทธ์ จันทร์มินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

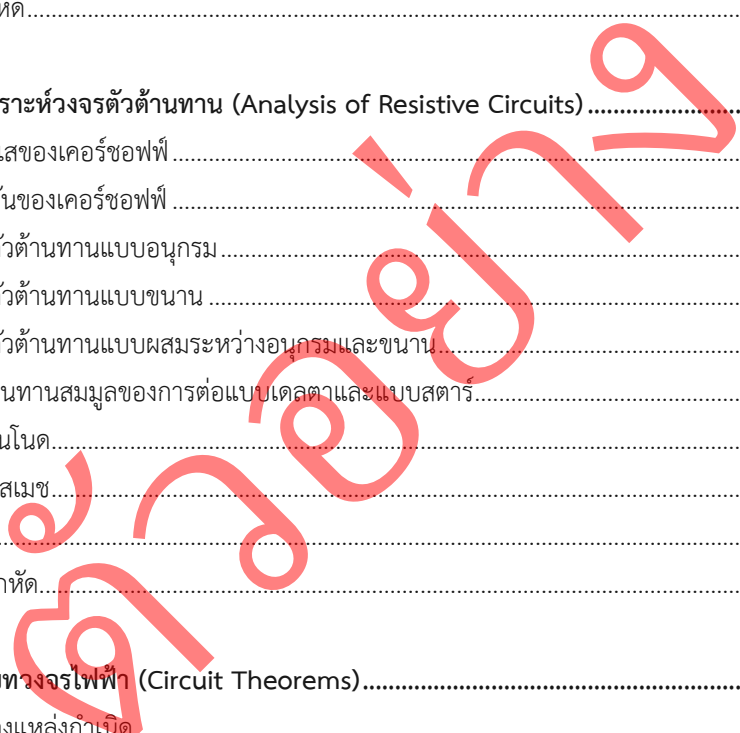
มหาวิทยาลัยนเรศวร



# คำอธิบาย



<b>บทที่ 1 องค์ประกอบและปริมาณในวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit Elements and Quantities).....</b>	<b>1</b>
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 แหล่งกำเนิดสัญญาณขึ้น .....	27
1.8 สรุป .....	31
1.9 แบบฝึกหัด .....	32
<b>บทที่ 2 การวิเคราะห์วงจรตัวต้านทาน (Analysis of Resistive Circuits) .....</b>	<b>35</b>
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
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีบทวงจรไฟฟ้า (Circuit Theorems).....</b>	<b>91</b>
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



<b>บทที่ 4 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitors and Inductors)</b> .....	<b>135</b>
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
<b>บทที่ 5 วงจรอันดับหนึ่ง (First-Order Circuits)</b> .....	<b>175</b>
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
<b>บทที่ 6 วงจรอันดับสอง (Second-Order Circuits)</b> .....	<b>227</b>
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



<b>บทที่ 7 การวิเคราะห์สถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Steady-State Analysis) .....</b>	<b>275</b>
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
<b>บทที่ 8 กำลังในสถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Steady-State Power).....</b>	<b>329</b>
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
<b>บทที่ 9 วงจรสามเฟส (Three-Phase Circuits).....</b>	<b>365</b>
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
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>407</b>
<b>ดัชนี.....</b>	<b>409</b>







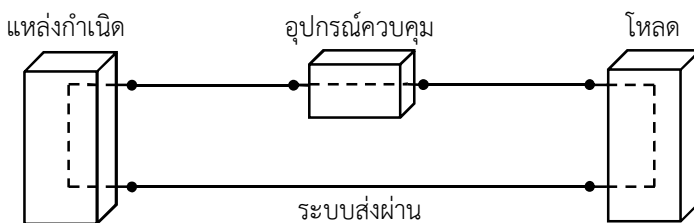
# องค์ประกอบและปริมาณ ในวงจรไฟฟ้า

(Electrical Circuit Elements and Quantities)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า ผู้ที่เริ่มศึกษาวงจรไฟฟ้าควรทราบนิยามของวงจรไฟฟ้า ความหมายของการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า และหน่วยที่ใช้เป็นมาตรฐานในการวัดค่าปริมาณดังกล่าว การเชื่อมกันขององค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าทำให้สามารถหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าในวงจรได้โดยแก้สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของปริมาณที่วัดค่าได้เหล่านั้น ดังนั้นความเข้าใจในการทำงานขององค์ประกอบแต่ละประเภทซึ่งทำให้ทราบเงื่อนไขของปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

## 1.1 องค์ประกอบวงจร

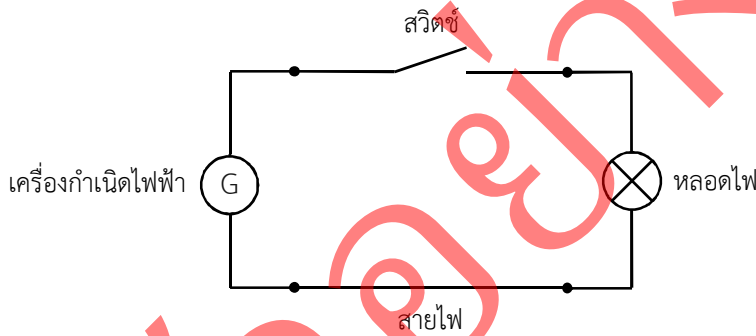
ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนดังรูปที่ 1.1 ส่วนที่ 1 คือแหล่งกำเนิด (Source) เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เซลล์สุริยะ แบตเตอรี่ มีหน้าที่ผลิตและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่ 2 คือ โหลด (Load) ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการใช้พลังงานที่ได้รับจากแหล่งกำเนิด อุปกรณ์ส่วนใหญ่ภายในบ้านเรือนจัดเป็นโหลด เช่น 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 องค์ประกอบไวงานหรือองค์ประกอบแอทีฟ (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)



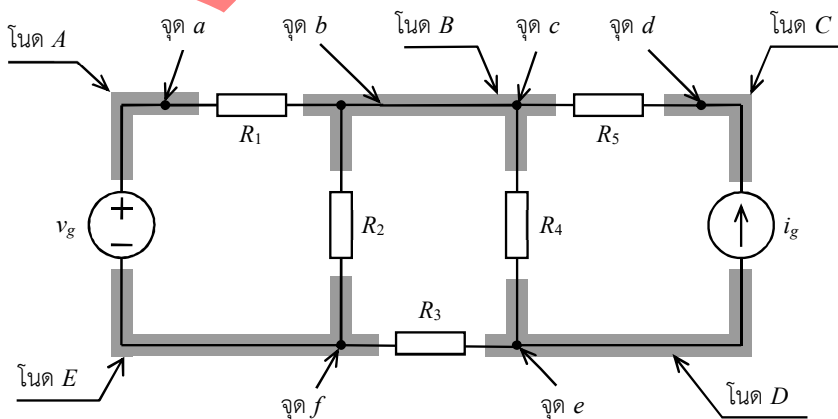
# การวิเคราะห์วงจรตัวต้านทาน

(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 จุดแต่ศักร์ทุกตำแหน่งภายในโนดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.1 โหนดและจุดในวงจรไฟฟ้า

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

“ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์”

ใจความของกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์อาจแสดงได้อีก 2 รูปแบบคือ

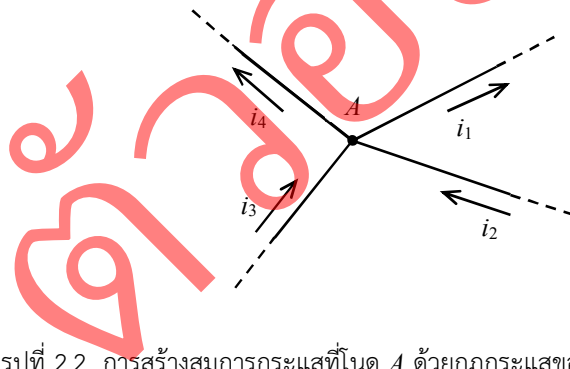
“ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลออกจากโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์”

และ

“ผลบวกของกระแสที่ไหลเข้าโนดใด ๆ มีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสที่ไหลออกจากโนดนั้น”

ซึ่งเทียบได้กับการไหลของน้ำในท่อ นั่นคือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่จุดใดจุดหนึ่งภายในท่อต้องเท่ากับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากจุดนั้น

คำว่า “ผลบวกทางพีชคณิต” (Algebraic sum) หมายความว่าเราต้องคำนึงถึงทิศทางของกระแสที่ใช้อ้างอิงด้วย 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 นั้นหมายความว่ากระแสที่ไหลออกจากจุด  $A$  จะมีเครื่องหมายเป็นลบ เราจะได้

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



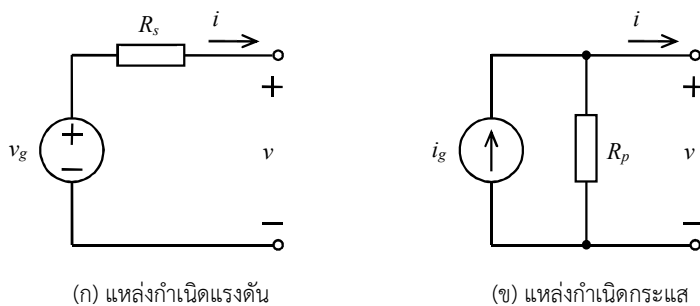
# ทฤษฎีบทวงจรไฟฟ้า

(Circuit Theorems)

แม้ว่าเราสามารถวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยวิธีแรงดันโหนดและวิธีกระแสเมช ร่วมกับกฎของโอห์ม การหาค่าความต้านทานสมมูล การแบ่งแรงดัน และการแบ่งกระแส อย่างไรก็ตาม 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



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดของจริง

ในการแปลงจากแหล่งกำเนิดแรงดันเป็นแหล่งกำเนิดกระแส เราต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่ 3.1(ก) กับรูปที่ 3.1(ข) โดยเริ่มจากใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในรูปที่ 3.1(ก)

$$v_g = R_s i + v$$

หารตลอดด้วย  $R_s$  จะได้

$$\frac{v_g}{R_s} = i + \frac{v}{R_s} \quad (3.1)$$

และใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ในรูปที่ 3.1(ข) จะได้

$$i_g = i + \frac{v}{R_p} \quad (3.2)$$

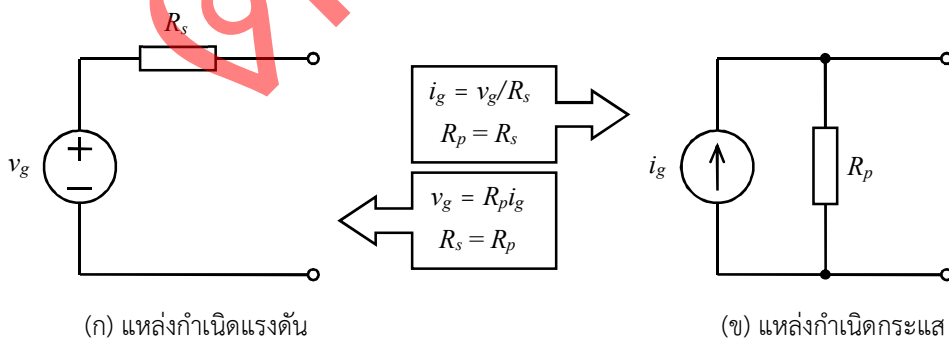
จากนั้นเปรียบเทียบสมการที่ (3.2) กับ (3.1) เราพบว่าแบบจำลองทั้งสองจะสมมูลกันก็ต่อเมื่อ

$$i_g = \frac{v_g}{R_s} \text{ และ } R_p = R_s \quad (3.3)$$

ดังนั้นเราสามารถแปลงแหล่งกำเนิดแรงดัน  $v_g$  ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $R_s$  ให้กลายเป็นแหล่งกำเนิดกระแส  $i_g$  ที่ต่อขนานกับตัวต้านทาน  $R_p$  ได้โดยใช้สมการที่ (3.3) และในทำนองเดียวกันเราสามารถแปลงแหล่งกำเนิดกระแส  $i_g$  ซึ่งต่อขนานกับตัวต้านทาน  $R_p$  ให้กลายเป็นแหล่งกำเนิดแรงดัน  $v_g$  ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน  $R_s$  ได้โดยใช้

$$v_g = R_p i_g \text{ และ } R_s = R_p \quad (3.4)$$

เราอาจสรุปการแปลงแหล่งกำเนิดได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ การแปลงแหล่งกำเนิดมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการลดรูปของวงจร โดยสามารถลดจำนวนโหนดหรือจำนวนเมชซึ่งช่วยให้เราวิเคราะห์วงจรได้ง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.2 การแปลงระหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันกับแหล่งกำเนิดกระแส



# ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

(Capacitors and Inductors)

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

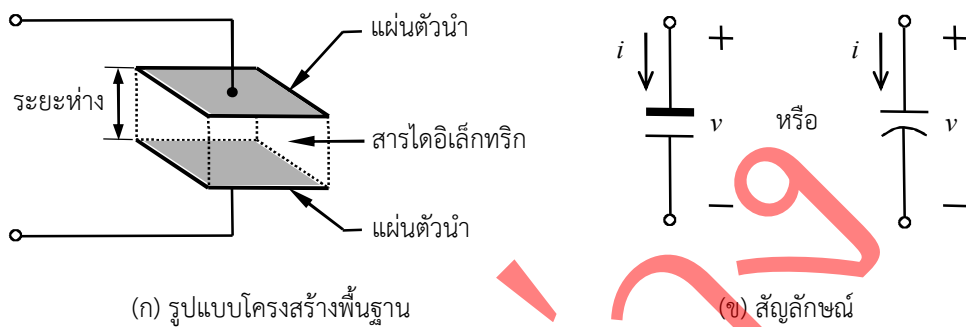
## 4.1 ตัวเก็บประจุและความจุ

ในปัจจุบันตัวเก็บประจุถูกนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับปล่อยแสงแฟลช ในกล้องถ่ายรูป การปรับสัญญาณในระบบวิทยุและโทรทัศน์ การลดสัญญาณรบกวนในวงจรไฟฟ้า การเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ปั๊ม การคุมค่าแรงดันและการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานทั่วไป

ตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบที่มีสองขั้วต่อซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยตัวนำ 2 ชั้นที่คั่นด้วยฉนวนหนึ่งในรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 4.2(ก) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่นที่ขนานกันและถูกทำให้แยกจากกันด้วยสารไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.2(ข) ซึ่งเทียบเคียงมาจากรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นแผ่นตัวนำคู่ขนานนั่นเอง



(ก) รูปแบบโครงสร้างพื้นฐาน (ข) สัญลักษณ์  
รูปที่ 4.2 รูปแบบโครงสร้างพื้นฐานและสัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบในวงจรไฟฟ้าที่ถูกออกแบบมาเพื่อเก็บประจุ เนื่องจากแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุเป็นโลหะจึงมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ในสภาวะปกติ แผ่นตัวนำทั้งสองมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือ ในแต่ละแผ่นไม่มีการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอนเพิ่ม หลังจากนำตัวเก็บประจุมาต่อกับแหล่งกำเนิดแรงดัน อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) จะถูกศัลย์บวกของแหล่งกำเนิดดึงออกจากแผ่นตัวนำด้านบนและถูกศัลย์ลบผลักไปอยู่ที่แผ่นตัวนำล่างดังรูปที่ 4.3(ก) แผ่นตัวนำด้านบนสูญเสียอิเล็กตรอนจึงมีประจุเป็นบวก ในขณะที่แผ่นตัวนำด้านล่างได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มจึงมีประจุเป็นลบ ในขณะที่ตัวเก็บประจุกำลังถูกประจุและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะหยุดลงหลังจากที่ตัวเก็บประจุถูกประจุเต็มเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งกำเนิด อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตามเส้นทางในวงจรที่อยู่ภายนอกตัวเก็บประจุ นั่นคือ ไม่มีกระแสไหลผ่านสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ การย้ายอิเล็กตรอนจำนวน  $q$  คูลอมป์ในระหว่างการประจุส่งผลให้แผ่นบนสูญเสียอิเล็กตรอนจำนวน  $q$  คูลอมป์จึงมีประจุเท่ากับ  $+q$  ในขณะที่แผ่นล่างได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มจำนวน  $q$  คูลอมป์จึงมีประจุเท่ากับ  $-q$  ดังรูปที่ 4.3(ข) เราสามารถตีความได้ว่าจำนวนประจุที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้มีค่าเท่ากับ  $q$  คูลอมป์





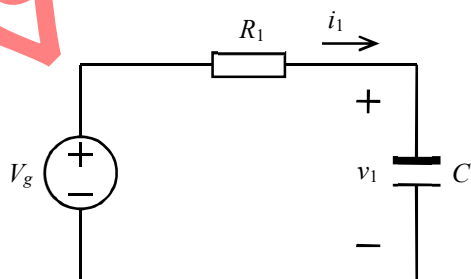
# วงจรอันดับหนึ่ง

(First-Order Circuits)

พฤติกรรมของวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) โดยทั่วไปการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ยากกว่าการแก้สมการพีชคณิต ซึ่งโดยส่วนใหญ่อันดับของสมการเชิงอนุพันธ์จะเท่ากับจำนวนองค์ประกอบสะสมพลังงานในวงจร นั่นคือจำนวนตัวเก็บประจุรวมกับจำนวนตัวเหนี่ยวนำ และการใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์กับวงจรที่มีตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำ หรือมีตัวเหนี่ยวนำเพียงตัวเดียวโดยไม่มีตัวเก็บประจุ นั้นจะทำให้เราได้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First-order differential equation) เราจึงเรียกววงจรเหล่านี้ว่า “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

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

แทนค่า  $i_1 = C dv_1/dt$  แล้วจัดรูปสมการ จะได้

$$\frac{dv_1}{dt} + \frac{1}{R_1 C} v_1 = \frac{1}{R_1 C} V_g \quad (5.1)$$

จะเห็นว่าสมการที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และในที่นี้จะแก้สมการโดยการแยกตัวแปรแล้วหาปริพันธ์ของแต่ละด้านของสมการ นั่นคือ

$$\int \frac{dv_1}{v_1 - V_g} = -\frac{1}{R_1 C} \int dt$$

จะได้

$$\ln(v_1 - V_g) = -\frac{t}{R_1 C} + A_1$$

โดยที่  $A_1$  คือค่าคงตัวของการหาปริพันธ์

$$v_1 = \exp\left(-\frac{t}{R_1 C} + A_1\right) + V_g$$

จัดรูปสมการ จะได้

$$v_1 = A_2 \exp\left(-\frac{t}{R_1 C}\right) + V_g \quad (5.2)$$

โดยที่  $A_2 = \exp(A_1)$  ซึ่งเป็นค่าคงตัว

สมการที่ (5.2) แสดงให้เห็นว่าผลเฉลยทั่วไปของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย 2 ส่วนคือพจน์ที่เป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลังและพจน์ที่มีค่าคงที่ พจน์แรกเป็นฟังก์ชันที่เลขชี้กำลังมีค่าเป็นลบ และมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและความจุซึ่งบ่งบอกถึงธรรมชาติของวงจร จึงเรียกพจน์นี้ว่า “ผลตอบสนองธรรมชาติ” (Natural response) และเมื่อเวลาผ่านไปพจน์นี้จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นศูนย์ ในขณะที่พจน์ที่สองมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิด เราจึงอาจเรียกพจน์นี้ว่า “ผลตอบสนองแบบบังคับ” (Forced response) ซึ่งในกรณีนี้ พจน์นี้จะมีค่าคงที่เนื่องจากค่าแรงดันของแหล่งกำเนิดมีค่าคงที่ และเราเรียกผลบวกของผลตอบสนองทั้งสองชนิดดังกล่าวว่า “ผลตอบสนองบริบูรณ์” (Complete response)

จากสมการที่ (5.2) เราสามารถคำนวณค่า  $A_2$  ได้โดยการแทนค่า  $v_1(0) = 0$  ในสมการที่ (5.2) แล้วแก้สมการ จะได้

$$A_2 = -V_g$$



# วงจรอันดับสอง

(Second-Order Circuits)

ความจุและความเหนี่ยวนำมีอยู่ทั่วไปในระบบไฟฟ้าใด ๆ การหาผลตอบสนองในวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมของวงจรและสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ เราได้เรียนรู้จากบทที่ผ่านมาว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์ และเราหาผลตอบสนองได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ผลตอบสนองบริบูรณ์ประกอบด้วยผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองแบบบังคับ ดังนั้นการหาผลตอบสนองบริบูรณ์ในวงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจึงเป็นประเด็นสำคัญที่เราจะศึกษาในบทนี้

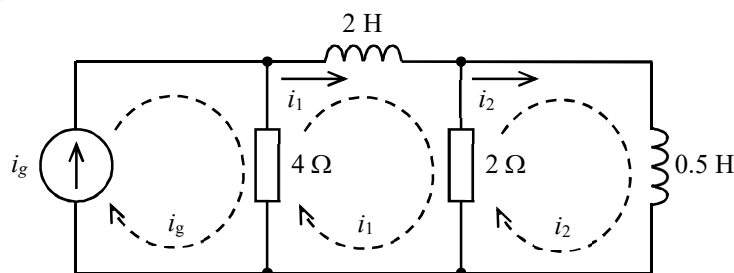
## 6.1 สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง

โดยทั่วไปในวงจรที่มีองค์ประกอบสะสมพลังงานสองตัว ไม่ว่าจะเป็นวงจรที่มีตัวเก็บประจุสองตัว วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัว หรือวงจรที่มีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำอย่างละหนึ่งตัว เราสามารถสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันของตัวเก็บประจุหรือของกระแสของตัวเหนี่ยวนำโดยอาศัยกฎกระแสและกฎแรงดันของเคอร์ชอฟท์รวมกับการใช้กฎของโอห์มรวมทั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวเก็บประจุและของตัวเหนี่ยวนำ



### ตัวอย่างที่ 6.1

พิจารณาวงจรในรูปที่ 6.1 จงหาสมการเชิงอนุพันธ์ของ  $i_1$  โดยใช้วิธีกระแสเมช



รูปที่ 6.1 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 6.1

วิธีทำ

ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์รอบเมฆกลาง จะได้

$$\frac{di_1}{dt} + 6i_1 - 2i_2 = 4i_g \quad (6.1)$$

และใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์รอบเมฆขวา จะได้

$$-2i_1 + 0.5\frac{di_2}{dt} + 2i_2 = 0 \quad (6.2)$$

จัดรูปของ  $i_2$  ในสมการที่ (6.1) จะได้

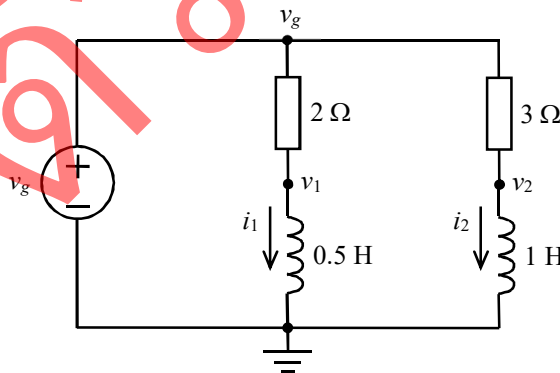
$$i_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{di_1}{dt} + 6i_1 - 4i_g \right)$$

แทน  $i_2$  ลงในสมการที่ (6.2) แล้วจัดรูป จะได้

$$\frac{d^2i_1}{dt^2} + 10\frac{di_1}{dt} + 16i_1 = 4\frac{di_g}{dt} + 16i_g \quad (6.3)$$

#

สมการที่ (6.3) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (Second-order differential equation) ซึ่งโดยทั่วไปวงจรอันดับสองจะประกอบด้วยองค์ประกอบสะสมพลังงานสองตัว แต่มีกรณียกเว้น ได้แก่ วงจรในรูปที่ 6.2 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำสองตัว และในที่นี้เลือกวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงดันโนด



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัว

เมื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่โนดซึ่งมีแรงดันเท่ากับ  $v_1$  และที่โนดซึ่งมีแรงดันเท่ากับ  $v_2$  จะได้



# การวิเคราะห์สถานะอยู่ตัว ของสัญญาณรูปไซน์

(Sinusoidal Steady-State Analysis)

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

ในบทนี้เราจะศึกษาวงจรที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ เนื่องจากผลตอบสนองธรรมชาติไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดและสามารถหาได้ด้วยวิธีการที่อธิบายในบทที่ผ่านมา ดังนั้นเป้าหมายของเราคือการหาผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวของสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งเป็นผลตอบสนองแบบบังคับและมีค่าเหลืออยู่หลังจากผลตอบสนองชั่วคราวกลายเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง

## 7.1 คุณสมบัติของสัญญาณรูปไซน์และเฟสเซอร์

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

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

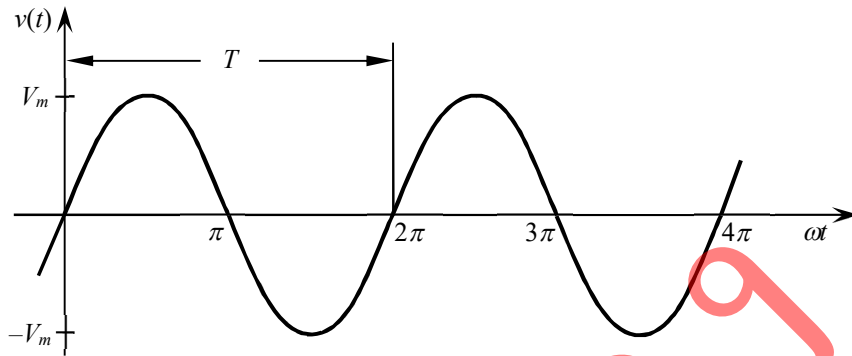
โดยที่  $V_m$  เป็นแอมพลิจูด (Amplitude) ของ  $v(t)$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของสัญญาณ และ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม (Angular frequency) ซึ่งบ่งบอกถึงความเร็วในการแกว่งของสัญญาณ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

เนื่องจากสัญญาณรูปไซน์มีฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodic function) ซึ่งเราสามารถเขียนได้ว่า

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

โดยที่  $T$  คือคาบของสัญญาณ นั่นคือ ฟังก์ชันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงในหนึ่งรอบ (Cycle) แล้ววนกลับมาซ้ำค่าเดิมทุก ๆ  $T$  วินาที เราเขียนความสัมพันธ์ระหว่างคาบกับความถี่เชิงมุมเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (7.1)$$



รูปที่ 7.1 สัญญาณแรงดันรูปไซน์

ดังนั้นใน 1 วินาที สัญญาณจะมีจำนวนรอบเท่ากับ  $1/T$  รอบ ซึ่งเป็นนิยามของความถี่ (Frequency) ของสัญญาณ ความถี่มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์ (hertz, Hz) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับคาบสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$f = \frac{1}{T} \quad (7.2)$$

จากสมการที่ (7.1) และ (7.2) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมกับความถี่ของสัญญาณ คือ

$$\omega = 2\pi f \quad (7.3)$$

เราสามารถเขียนอธิบายสัญญาณแรงดันรูปไซน์ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (7.4)$$

จะเห็นว่า นอกจากแอมพลิจูดและความถี่เชิงมุม เรายังใช้ “มุมเฟส” (Phase angle,  $\phi$ ) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “เฟส” (Phase) ร่วมในการอธิบายสัญญาณรูปไซน์ใด ๆ ด้วย เนื่องจาก  $\omega t$  มีหน่วยเป็นเรเดียน ดังนั้น  $\phi$  ควร มีหน่วยเป็นเรเดียน แต่ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักเขียน  $\phi$  ในหน่วยองศา (degrees) เช่น เราอาจเขียนเป็น

$$v(t) = V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ หรือ } v(t) = V_m \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ ก็ได้}$$



# กำลังในสถานะอยู่ตัว ของสัญญาณรูปไซน์

(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 ถังจรรยาอิเล็กทรอนิกส์ได้รับสัญญาณเข้าที่มีค่ากำลังสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด แล้วสัญญาณออกจะเพี้ยน และวงจรอาจเสียหายได้หากรับกำลังที่สูงเกินนี้เป็นระยะเวลาานกำหนดให้แรงดันและกระแสในสถานะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ

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

เราคำนวณค่ากำลังขณะหนึ่งได้จาก

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

และเมื่อประยุกต์ใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

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

เราจะได้

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

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังขณะหนึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาและมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ของสัญญาณแรงดันและกระแส



### ตัวอย่างที่ 8.1

กำหนดให้ตัวต้านทานตัวหนึ่งมีค่าแรงดันคร่อมเท่ากับ  $v = 2 \cos t$  V และมีค่ากระแสที่ผ่านเท่ากับ  $i = 1.5 \cos t$  A จงหาค่ากำลังขณะหนึ่งที่ตัวต้านทานนี้ได้รับ

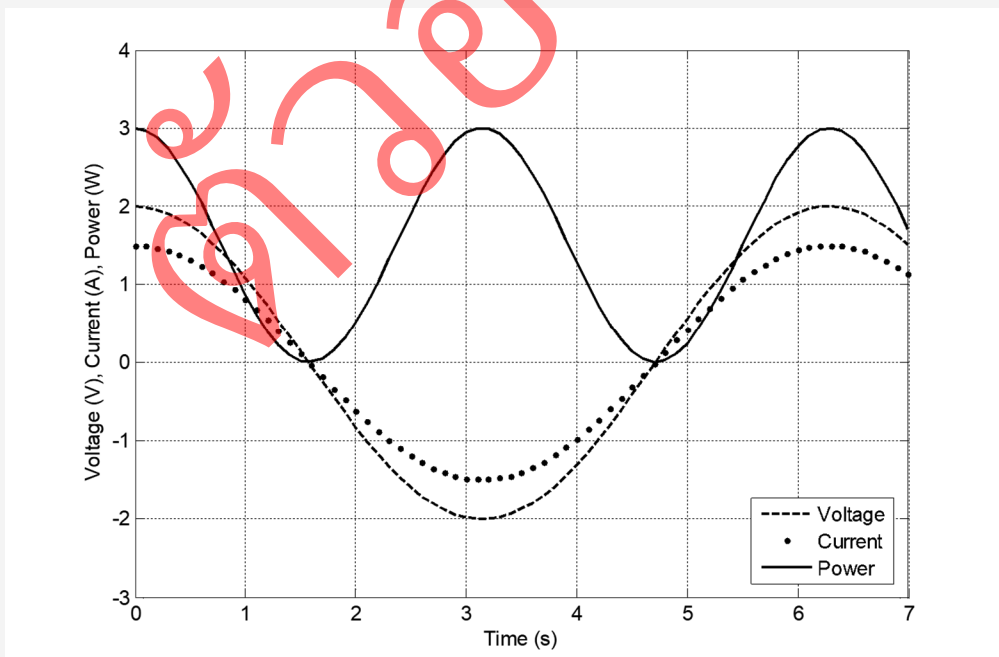
#### วิธีทำ

กำลังขณะหนึ่งที่ตัวต้านทานได้รับมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{V_m I_m}{2} [\cos(2t + \theta_v + \theta_i) + \cos(\theta_v - \theta_i)] \\ &= \frac{2 \times 1.5}{2} [\cos(2t + 0 + 0) + \cos(0 - 0)] \\ &= 1.5 \cos 2t + 1.5 \text{ W} \end{aligned}$$

#

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟเส้นทึบในรูปที่ 8.1 จะเห็นว่ากำลังขณะหนึ่งที่ตัวต้านทานได้รับนั้นมีค่าเป็นบวกเสมอ นั่นคือ กำลังไหลจากแหล่งกำเนิดไปสู่ตัวต้านทาน



รูปที่ 8.1 กราฟกำลังขณะหนึ่งที่ตัวต้านทานได้รับในตัวอย่างที่ 8.1





# วงจรสามเฟส

(Three-Phase Circuits)

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

## 9.1 วงจรสามเฟสสมดุล

แหล่งกำเนิดในวงจรสามเฟสสร้างสัญญาณแรงดันรูปไซน์ 3 สัญญาณที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมเฟสห่างกัน  $120^\circ$  ซึ่งเรียกว่า “แรงดันสามเฟสสมดุล” (Balanced three-phase voltages) ดังนั้นแหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสจึงคล้ายกับการต่อแหล่งกำเนิดแรงดันรูปไซน์จำนวน 3 แหล่งที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมเฟสห่างกัน  $120^\circ$  ดังตัวอย่างในรูปที่ 9.1

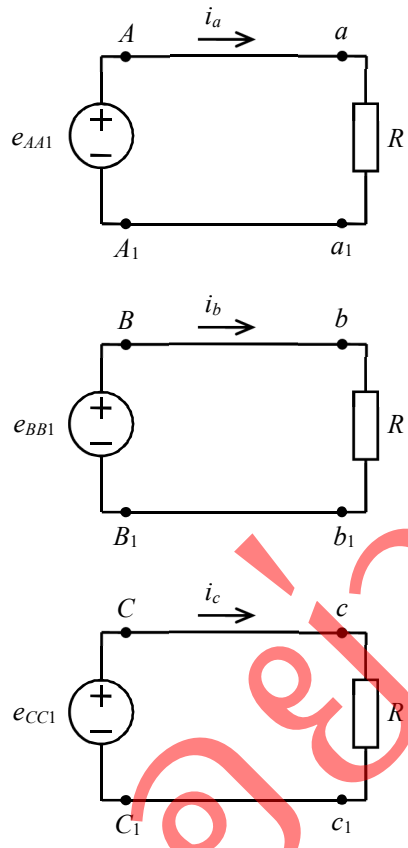
โดยที่

$$e_{AA1} = 220\cos 314t \text{ V}$$

$$e_{BB1} = 220\cos(314t - 120^\circ) \text{ V}$$

$$e_{CC1} = 220\cos(314t - 240^\circ) = 220\cos(314t + 120^\circ) \text{ V}$$

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



รูปที่ 9.1 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับจำนวน 3 วงจร

โดยเขียนแรงดันของแหล่งกำเนิดทั้งสามในรูปเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{AA1} &= 220\angle 0^\circ \text{ V} \\ \mathbf{E}_{BB1} &= 220\angle -120^\circ \text{ V} \\ \mathbf{E}_{CC1} &= 220\angle -240^\circ = 220\angle 120^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

ลำดับที่แรงดันสามเฟสเกิดขึ้น เรียกว่า “ลำดับเฟส” (Phase sequence) ซึ่งโดยทั่วไป เรานิยมใช้ลำดับเฟสแบบวงดังแสดงในรูปที่ 9.3 จะเห็นว่า ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega$  แรงดันเฟสเซอร์ในแผนภาพมีลำดับการหมุนจาก  $\mathbf{E}_{AA1}$  ไปยัง  $\mathbf{E}_{BB1}$  และไปยัง  $\mathbf{E}_{CC1}$  นั่นคือ มีลำดับแบบ  $abc$  ซึ่งทำให้สัญญาณแรงดัน  $e_{AA1}$  มีค่าสูงสุดเป็นเฟสแรก ตามมาด้วยสัญญาณแรงดัน  $e_{BB1}$  และสัญญาณแรงดัน  $e_{CC1}$  ดังรูปที่ 9.2



## ทฤษฎีการคำนวณ : รูปแบบการคำนวณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง: ผศ. ดร.พงศ์พันธ์ กิจสนาโยธิน

ปีพิมพ์ : 1/2561

ทฤษฎี มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปฏิบัติ การศึกษาทฤษฎี การคำนวณจึงมีส่วนสำคัญในการเข้าใจการทำงานของคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไป เราจะคิดว่าคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องจักรที่มีความซับซ้อน และมีการทำงานยุ่งยาก ดังนั้นเมื่อต้องการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนด้วย เครื่องมือที่ซับซ้อนจึงเป็นเรื่องไม่ง่ายหนังสือเล่มนี้นำเสนอรูปแบบ ที่เข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อนสำหรับอธิบายการทำงานของคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการกำหนดวิธีการในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนรวบรวม เนื้อหาเรื่องรูปแบบการคำนวณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย เครื่องสถานะจำกัด นิพจน์พื้นฐาน ไวยากรณ์ที่ไม่มีรีบิท เครื่องสถานะจำกัดแบบดัดแปลง และเครื่องจักรทัวริง แต่ละเนื้อหา จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งการพิสูจน์ทฤษฎี ตัวอย่าง ของปัญหา และแนวคิดวิธีการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ

## แนะนำหนังสือ กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

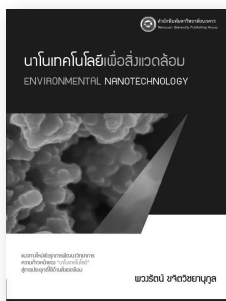


## ระบบควบคุม

ผู้แต่ง: ผศ. ดร.มธุทิตา สงข์จันทร์

ปีพิมพ์ : 1/2561

หนังสือ “ระบบควบคุม” เหมาะสำหรับนิสิตนักศึกษาหรือ บุคคลทั่วไปที่สนใจเกี่ยวกับระบบควบคุมเบื้องต้น ภายในเล่ม ประกอบไปด้วยเนื้อหาสำคัญที่ใช้สำหรับการเรียน การสอนใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า อาทิ การหาฟังก์ชัน ถ่ายโอนของระบบแผนผังบล็อก กราฟการไหล ของสัญญาณ การควบคุมแบบป้อนกลับ ผลตอบสนองของระบบ อันดับหนึ่งและอันดับสอง วิธีทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบ ทางเดินราก แผนภาพโบท แต่ละขบที่มีตัวอย่างการวิเคราะห์ โจทย์และแบบฝึกหัดท้ายบทมากกว่าร้อยข้อ รวมทั้งการใช้คำสั่ง โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม ในทุกบทอีกด้วย

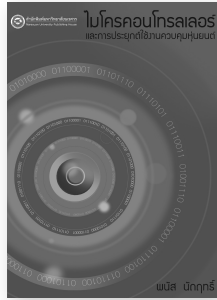


## นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม

ผู้แต่ง: รศ. ดร.ปงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล

ปีพิมพ์ : 1/2557

แนวทางใหม่เชิงรุกการพัฒนาวิทยาการความก้าวหน้าของ  
“นาโนเทคโนโลยี” สู่อุตสาหกรรมใช้ด้านสิ่งแวดล้อม



## ไมโครคอนโทรลเลอร์และการประยุกต์ใช้ในงานควบคุมหุ่นยนต์

ผู้แต่ง: ผศ. ดร.พนัส นัถฤทธิ์

ปีพิมพ์ : 1/2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นระบบที่รวบรวมเอาคุณสมบัติและองค์ประกอบเกือบทุกอย่างของระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาไว้ภายในตัวไอซีเพียงตัวเดียว ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์หรืองานควบคุมขนาดเล็ก เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปมักมีโครงสร้างขนาดใหญ่ หากนำมาใช้ในงานลักษณะดังกล่าวจะไม่คุ้มกับการลงทุน อีกทั้งยังส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในงานภาคอุตสาหกรรม การวิจัยเพื่อพัฒนาระบบควบคุมประเภทต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้ในงานควบคุมหุ่นยนต์



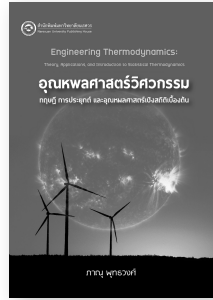
## คาร์บอนกัมมันต์

Activated carbon

ผู้แต่ง: รศ. ดร.สัมพันธ์ ไม้พวง

ปีพิมพ์ : 1/2558

ประเภทและกระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ จำเป็นที่จะต้องศึกษาให้เข้าใจ โดยเฉพาะการวิจัยและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า เพื่อให้ได้ คาร์บอนกัมมันต์ที่มีคุณภาพและต้นทุนการผลิตต่ำ รวมทั้งการวิเคราะห์ และตรวจสอบให้ได้มาตรฐาน ด้วยวิธีการที่น่าเชื่อถือและยอมรับได้ และการใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้านของคาร์บอนกัมมันต์ ในที่นี้ได้รวบรวมจากเอกสารตีพิมพ์ในวารสารจำนวนมาก เหมาะสำหรับนิสิต นักศึกษา หรือผู้ที่สนใจในการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์



## อุณหพลศาสตร์วิศวกรรม:

ทฤษฎี การประยุกต์

และอุณหพลศาสตร์เชิงสถิติเบื้องต้น

ผู้แต่ง: ดร.ภาณุ พุทรวงศ์

ปีพิมพ์ : 1/2560

หนังสือ “อุณหพลศาสตร์วิศวกรรม: ทฤษฎี การประยุกต์ และอุณหพลศาสตร์เชิงสถิติเบื้องต้น” เหมาะสำหรับนิสิตนักศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมพลังงาน ฟิสิกส์ พลังงาน รวมไปถึงวิศวกรและผู้สนใจที่ต้องการศึกษาอุณหพลศาสตร์ในเชิงลึก โดยเนื้อหาจะเชื่อมโยงการประยุกต์ใช้งานอุณหพลศาสตร์ทางวิศวกรรมกับทฤษฎีที่มีที่มาจากศาสตร์ทางฟิสิกส์ เช่น สมการสถานะ ความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ทางอุณหพลศาสตร์ และยังรวมไปถึงอุณหพลศาสตร์เชิงสถิติเบื้องต้น ซึ่งเป็นการศึกษาอุณหพลศาสตร์ ในมุมมองจุลภาคเพื่อแสดงให้เห็นต้นทางของทฤษฎี ตั้งแต่กลศาสตร์ของอนุภาคกลศาสตร์ควอนตัมว่าถูกนำมาประยุกต์ใช้กับอุณหพลศาสตร์โดยมีความสอดคล้องกับอุณหพลศาสตร์ ในมุมมองมหภาคอย่างไร



## อุณหพลศาสตร์

ว่าด้วยหลักการโครงสร้าง

และกระบวนการทัศน์ยุคใหม่

ผู้แต่ง: รศ. ดร.บูรินทร์ กำจัดภัย

ปีพิมพ์ : 1/2558

แผนที่ช่วยเราไม่ให้หลงทางและช่วยให้เห็นภาพรวมของภูมิประเทศ ภูมิประเทศแห่งวิทยาศาสตร์นั้นกำหนดโดยธรรมชาติมันจึงมีความงามแฝงเร้นในทุกซอกส่วนหนังสือเล่มนี้เสนอแนวคิดส่วนใหญ่ของอุณหพลศาสตร์ในรูปแบบโครงสร้างเชิงทฤษฎีซึ่งเป็นแผนที่ในการค้นหาความงามในการเดินทางนี้ อุณหพลศาสตร์เป็นฟิสิกส์ที่ต่างจากฟิสิกส์สาขาอื่นๆ ทั้งหมด ด้วยเพราะมันไม่อาจสร้างได้จากหลักการแอ็กชัน หลักการพื้นฐานและโครงสร้างของวิชานี้ได้นำเสนอไว้ในหนังสือนี้โดยแสดงการพิสูจน์ที่มาที่ไปของสมการต่างๆ ไว้อย่างครบครัน ได้นำเสนอสะพานเชื่อมโยงจากฟิสิกส์ไปสู่ทัศนะเชิงประยุกต์ทางเคมีและวิศวกรรมไว้อย่างชัดเจน และยังเปิดประตูสู่กระบวนการทัศน์ยุคใหม่ของอุณหพลศาสตร์แบบไม่สมดุลและรูปแบบของวิชาเศรษฐศาสตร์เชิงอุณหพลศาสตร์อีกด้วย หนังสือเล่มนี้จึงเหมาะกับการเป็นหนังสืออ้างอิงสำหรับนักวิจัยและเหมาะเป็นตำราสำหรับผู้สอนและผู้เรียนในระดับปริญญาตรีถึงปริญญาโททางฟิสิกส์ วิศวกรรม และเคมีที่ต้องการเข้าใจอุณหพลศาสตร์อย่างเป็นระบบ



0 5596 8833-8836

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

nuph@nu.ac.th