



คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

เรื่องวิชา การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง บทที่ 3-6

**Creating and Evaluating the Effectiveness of Computer Assisted
Instruction Program Subject Electric Power System Analysis Chapter 3-6.**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนวัฒน์ ฉลาดสกุล

Assist. Prof. Tanawat Chalardsakul

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินงานของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับการอุดหนุนงบประมาณในการดำเนินการ

ปี พ.ศ. 2553

บทคัดย่อ

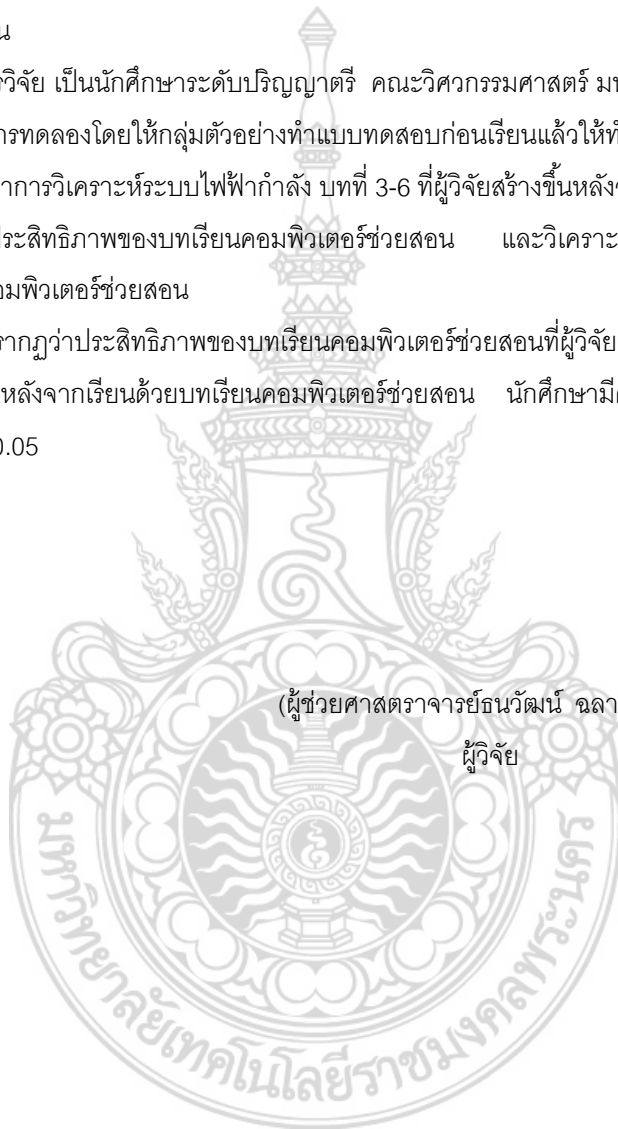
การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผู้วิจัยทำการทดลองโดยให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบก่อนเรียนแล้วให้ทำการเรียนโดยใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง บทที่ 3-6 ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นหลังจากนั้นให้ทำแบบทดสอบหลังเรียน แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

ผลการวิจัยครั้งนี้ปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล)

ผู้วิจัย



ABSTRACT

The purposes of the research were to create and efficiency validation of computer assisted for the courses of practiced to reading. Creating and Evaluating the Effectiveness of Computer Assisted Instruction Program Subject Electric Power System Analysis Chapter 3-6 based standard and analyses the leaning achievement of the student after by using computer assisted instruction.

The subjects in the study were first year diploma students enrolled in Rajamangala University of Technology Phra Nakhon . The Researcher using the experiment by let the students do until test before class, And then study by using computer assisted instruction focused on practiced to basic turning. After that let students do the unit test again at the class and calculate to find out the efficiency of the computer assisted instruction and analyses the leaning achievement of students after study .

The research result revealed that the efficiency of the computer assisted Instruction was efficient in standard, Moreover after learning achievement At significant level of 0.05 .

(Assist. Prof. Tanawat Chalardsakul)

RESEARCHER



สารบัญ

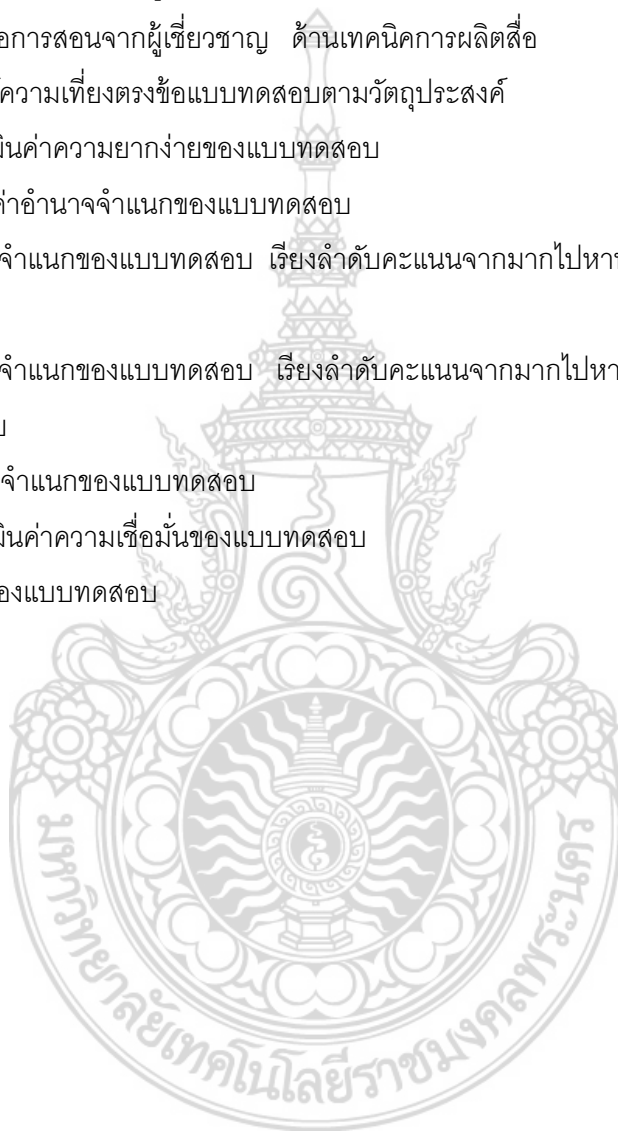
| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ๗ |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ๘ |
| สารบัญ | ๙ |
| สารบัญตาราง | ๑๑ |
| สารบัญภาพ | ๑๒ |
| บทนำ | 1 |
| - ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| - วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| - ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| - ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ | 2 |
| - ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง | 2 |
| - เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 3 |
| - สมมติฐานการวิจัย | 5 |
| - ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 5 |
| เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| - การวิเคราะห์เนื้อหาวิชา | 6 |
| - การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน | 7 |
| - การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน | 8 |
| - งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน | 9 |
| วิธีการวิจัย | 11 |
| - ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ | 11 |
| - กลุ่มตัวอย่าง | 11 |
| - เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 11 |
| - การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล | 13 |
| - สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล | 14 |
| ผลของการวิจัย | 17 |
| - ผลการวิเคราะห์ข้อมูล | 17 |
| - สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ | 19 |
| - สรุปผลการวิจัย | 19 |
| บรรณานุกรม | 20 |
| ภาคผนวก | 22 |
| - ราชานามผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบสื่อการสอน และหนังสือขอเชิญ เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบสื่อการสอน | 23 |
| - ขอบข่ายของเนื้อหาวิชา | 25 |
| - แบบประเมินสื่อการสอนด้านเนื้อหา | 26 |
| - แบบประเมินสื่อการสอนด้านเทคนิคการผลิตสื่อ | 27 |
| - เกณฑ์การประเมินสื่อการสอน | 28 |
| - ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเนื้อหา | 29 |
| - ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อ | 30 |
| - ผลการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของข้อสอบกับวัตถุประสงค์ | 31 |
| - แสดงผลการประเมินหาค่าความยากง่ายของแบบทดสอบ ฯ | 32 |
| - แสดงผลการประเมินหาค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ ฯ | 34 |
| - แสดงผลการประเมินหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ ฯ | 39 |
| - แสดงค่า T-test ของแบบทดสอบ | 41 |
| - ผลการคำนวณวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน | 44 |
| - ลักษณะรายวิชา | 45 |
| - บทดำเนินเรื่อง | 46 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1. แสดงการทดลองที่มีกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่ม ทำการทดลองก่อนและหลังการทดลองทันที | 11 |
| 2. แสดงค่าความคิดเห็นของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนจากผู้เชี่ยวชาญ | 17 |
| 3. แสดงค่าประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเนื้อหา | 29 |
| 4. แสดงค่าประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อ | 30 |
| 5. แสดงการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงข้อแบบทดสอบตามวัตถุประสงค์ | 31 |
| 6. แสดงผลการประเมินค่าความยากง่ายของแบบทดสอบ | 32 |
| 7. แสดงการประเมินค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ | 34 |
| 8. แสดงหาค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ เรียงลำดับคะแนนจากมากไปหาน้อยกลุ่มได้คะแนนสูง | 36 |
| 9. แสดงหาค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ เรียงลำดับคะแนนจากมากไปหาน้อยกลุ่มได้คะแนนน้อย | 37 |
| 10. แสดงผลค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ | 38 |
| 11. แสดงผลการประเมินค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ | 39 |
| 12. แสดงค่า T-test ของแบบทดสอบ | 41 |



สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1. แสดงขั้นตอนการสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน | 3 |
| 2. แสดงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล | 4 |



บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปฏิบัติอาชีพราชการครูสายการสอนหรือเป็นอาจารย์ผู้สอน เมื่อได้รับการสอบคัดเลือกแต่งตั้งให้มาปฏิบัติหน้าที่ ถ้าไม่มีประสบการณ์การสอนหรือไม่มีความรู้เชี่ยวชาญในเนื้อหาที่สอน ผู้สอนต้องศึกษาค้นคว้าหาความรู้ให้เข้าใจจัดเตรียมการสอนด้านเนื้อหาและอุปกรณ์สื่อการสอน ดังนั้นการสอนในวิชาเดิมหลายครั้งหลายภาคเรียน จะทำให้ผู้สอนมีความรู้อย่างเชี่ยวชาญและมีการพัฒนาทักษะการสอน นอกจากนี้จากงานหน้าที่หลัก คือ การสอนและยังมีภาระหน้าที่อย่างอื่นอีก เช่นงานธุรการด้านต่างๆ หรือกิจกรรมต่าง ๆ ในหน่วยงานตามที่ได้รับมอบหมายจากผู้บริหาร นอกจากนี้สถานศึกษาในปัจจุบันยังมีนโยบายพัฒนาด้านอื่น ๆ เช่น การพัฒนาบุคลากร การดำเนินงานวิจัย การดำเนินงานโครงการต่างๆ ที่ตอบสนองของความต้องการของชุมชนหรือองค์กรของรัฐ จากภาระงานหน้าที่ทั้งหมดของผู้สอนดังที่กล่าวมาต้องปฏิบัติควบคู่กับการสอน ทำให้มีผลกระทบต่อหน้าที่หลัก คือ การสอนไม่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับภาระของอาจารย์แต่ละท่าน

ปัจจุบันความเจริญทางเทคโนโลยี มีบทบาทต่อการพัฒนากิจการต่างๆ มาก การนำเทคโนโลยีมาใช้พัฒนาสื่อการเรียนการสอนเป็นวิธีการที่อาจารย์ผู้สอนให้ความสนใจ มีการประดิษฐ์คิดค้นอุปกรณ์สื่อสารและสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ “ คอมพิวเตอร์ ” และได้มีการนำมาใช้เพื่อการศึกษากันอย่างแพร่หลาย (กรมการศึกษานอกโรงเรียน , 2541 : 2)

คอมพิวเตอร์ช่วยสอนหมายถึง สื่อการเรียนการสอนทางคอมพิวเตอร์รูปแบบหนึ่งซึ่งใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการนำเสนอสื่อประสม ได้แก่ ข้อความ ภาพนิ่ง แผนภูมิ กราฟ ภาพเคลื่อนไหว วิดีทัศน์ และเสียง เพื่อถ่ายทอดเนื้อหาบทเรียน หรือองค์ความรู้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติและโครงสร้างของเนื้อหา มีเป้าหมาย คือ ดึงดูดความสนใจ และกระตุ้นผู้เรียนให้เกิดความกระตือรือร้น ช่วยให้ผู้เรียนที่เรียนอ่อนสามารถใช้เวลานอกเวลาเรียนในการฝึกฝนทักษะและเพิ่มเติมความรู้ เพื่อที่จะปรับปรุงการเรียนของตนให้ทันผู้เรียนคนอื่นได้ ดังนั้นผู้สอนจึงสามารถนำคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ไปใช้ในการสอนเสริมหรือสอนทบทวนการสอนปกติในชั้นเรียนได้ โดยที่ผู้สอนไม่จำเป็นต้องเสียเวลาในการสอนซ้ำกับผู้เรียนที่เรียนตามไม่ทันจัดการสอนเพิ่มเติม (ถนอมพร เลหาจรัสแสง , 2541 : 7 – 12)

ปัญหาของผู้ทำวิจัย คือการสอนวิชาที่มีนักศึกษาจำนวนตั้งแต่ 30-40 คน ต่อการสอน 1 ครั้ง ลักษณะเนื้อหาวิชามีทฤษฎีและปฏิบัติ การสอนวิชาดังกล่าวจำเป็นต้องสอนสาธิตและมีทฤษฎีเข้ามาเกี่ยวข้อง สอนโดยการแบ่งนักศึกษาออกออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ แล้วสอนสาธิตทุกกลุ่มจึงจะทำให้นักศึกษาได้รับความรู้ตามวัตถุประสงค์การสอนที่ตั้งไว้ จากลักษณะการสอนดังกล่าวอาจารย์ผู้สอนต้องเหนื่อยมากกว่าปกติที่สอนครั้งเดียว เพราะการสอนสาธิตครั้งเดียวทั้งห้อง อาจมีนักศึกษาบางคนที่ยังไม่เข้าใจเนื่องจากมองดูการสาธิตไม่เห็นชัดเจนและไม่กล้าถามก็ทำให้นักศึกษาดังกล่าวไม่สามารถปฏิบัติงานตามวัตถุประสงค์การสอนได้ ทำให้การฝึกปฏิบัติงานของนักศึกษามีผลสัมฤทธิ์ยังไม่ได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ทำให้ผู้วิจัยสนใจใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์เป็นสื่อในการสอนเพื่อใช้แก้ปัญหาของผู้วิจัยในการสอนปัจจุบัน คือ ประกอบการสอนเป็นกลุ่มเล็กหรือกลุ่มใหญ่ สอนทบทวนนักศึกษาที่ยังไม่เข้าใจและบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยอาจารย์ใหม่ที่ยังไม่มีประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญในการสอนหรืออาจารย์ที่ได้รับมอบหมายให้มาสอนแทน เนื่องจาก

ผู้สอนประจำติดุระราชการ เพื่อให้การเรียนการสอนดำเนินไปอย่างต่อเนื่องซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้ การฝึกปฏิบัติงานของนักศึกษา

วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

1. เพื่อสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6
2. เพื่อหาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เนื้อหาบทเรียนคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยอ้างอิงที่ใช้ทำเป็นสื่อในการสอนนี้ ใช้เนื้อหาวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต หลักสูตรปรับปรุงปี 2550 ที่ใช้ในการสอนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2553
2. ลักษณะของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน จะจัดทำเป็นโปรแกรมบรรจุลงในแผ่นดีวีดี หรือวีซีดี ผู้เรียนหรือผู้ใช้สื่อจะต้องนำแผ่นใส่ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถอ่านข้อมูลได้ จากนั้นโปรแกรมจะทำงานโดยอัตโนมัติแสดงภาพหน้าจอหลักให้ทราบ ผู้เรียนหรือผู้ใช้สามารถเลือกเนื้อหาที่ต้องการเรียนรู้ได้โดยการเลือกหัวข้อที่ต้องการ โปรแกรมจะแสดงเนื้อหาทั้งภาพและเสียงในเนื้อหานั้น ๆ เมื่อเรียนรู้จบ มีแบบทดสอบ 4 หัวเลือกให้ทำ เมื่อทำเสร็จทุกข้อ โปรแกรมจะบอกผู้เรียนว่าผ่านการทดสอบหรือไม่ โดยตั้งเกณฑ์ผ่าน 80 % ขณะการใช้งานบทเรียนผู้เรียนสามารถเลือกพักหยุดชั่วคราว หรือออกจากโปรแกรมได้ตลอดเวลา
3. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 โดยการเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน มีรายละเอียดการวิจัยดังนี้

1. ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้
2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง
3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
4. การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
5. การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้

การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผนการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยใช้แบบแผนการทดลองที่มีกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่ม ทำการทดสอบก่อนและทดสอบหลังการทดลองทันที

(One – Group Pretest – Posttest Design)

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

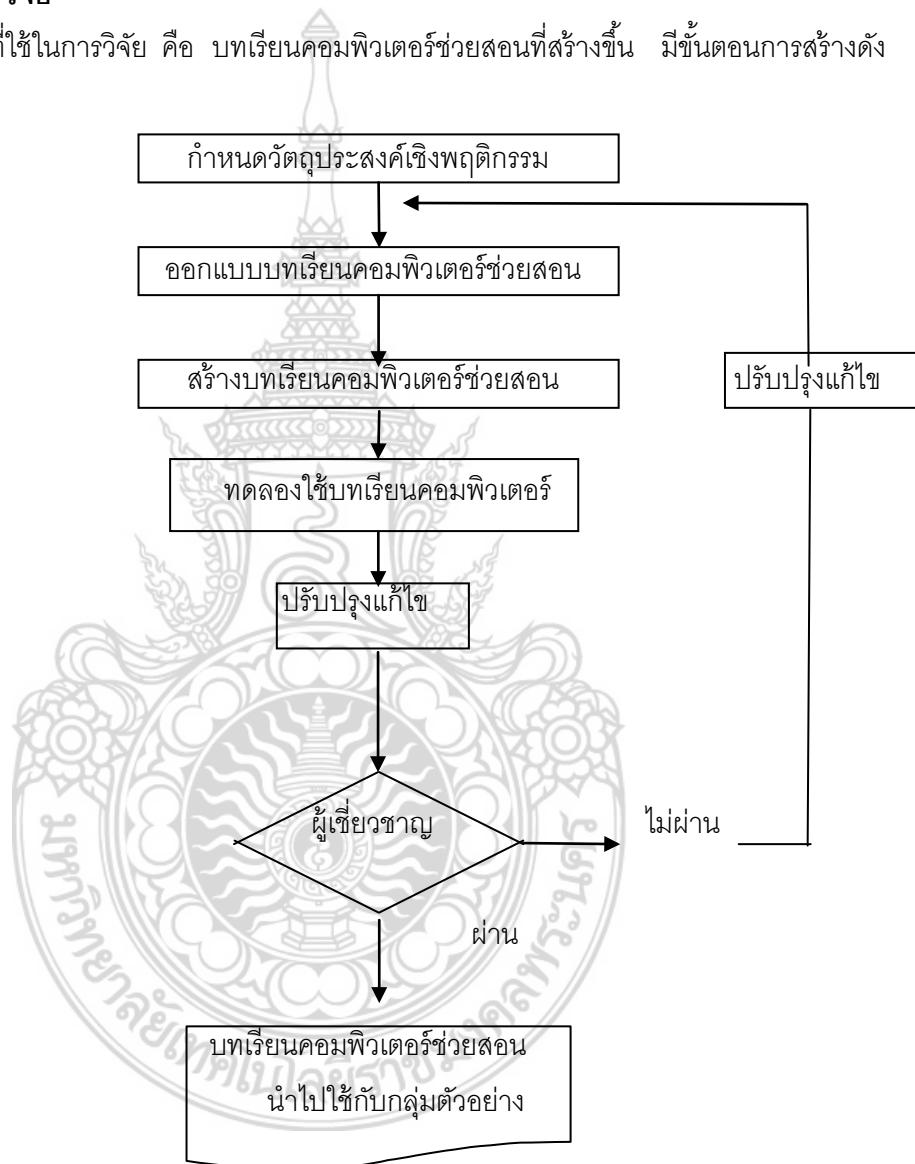
1. ประชากร คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมที่เปิดสอน ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นนักศึกษานักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนในวิชาหรือเนื้อหาวิชาตรงกับหัวข้องานวิจัยของผู้วิจัย ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 โดยจะทำการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงจำนวนนักศึกษาทั้งห้อง เพื่อนำมาทดลองและใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนซึ่งมีอาจารย์ผู้สอนและผู้วิจัยควบคุม

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น มีขั้นตอนการสร้างดัง

ภาพที่ 1

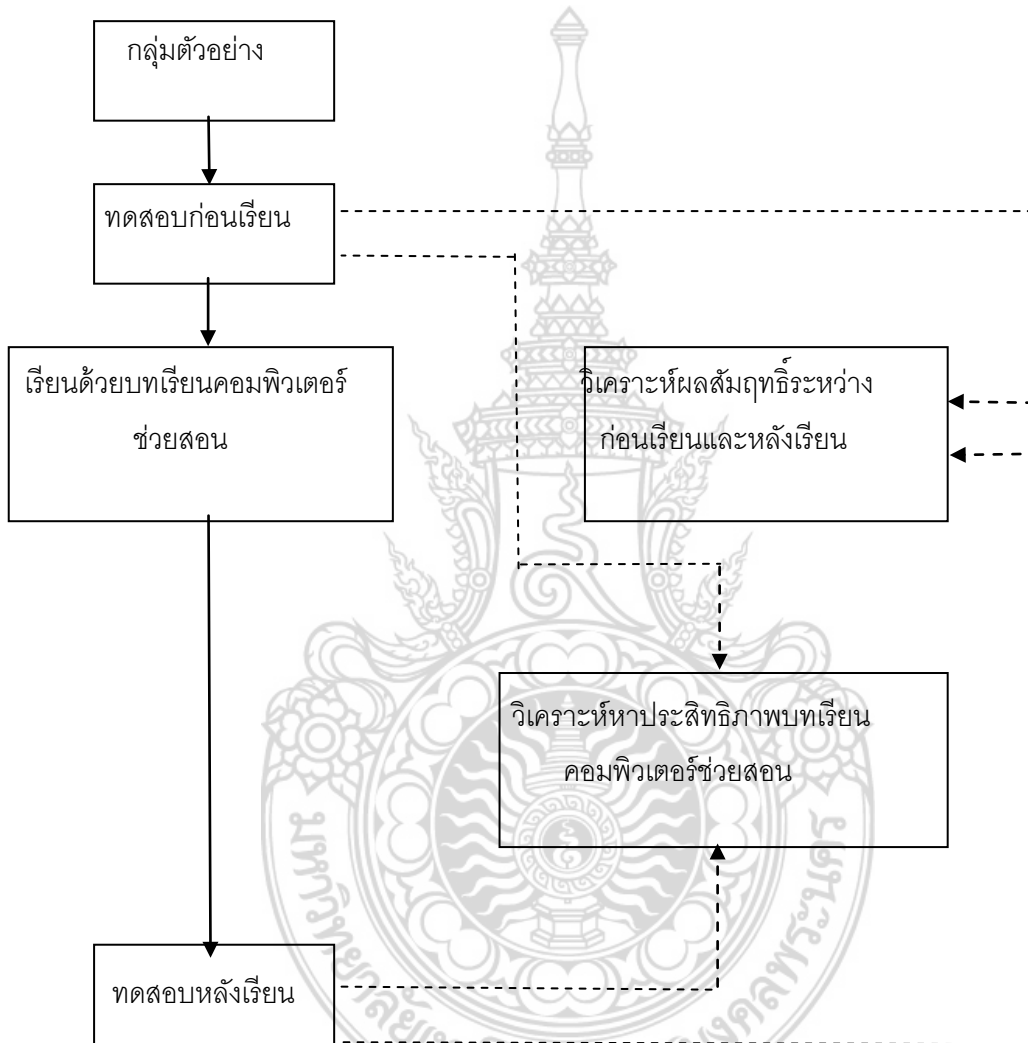


ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล มีขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้ การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดการทดลอง ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 ดังนี้

1. การเตรียมสถานที่
2. แจกแบบทดสอบให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบก่อนเรียน

3. ทำการสอนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
4. แจกแบบทดสอบเดิม ทำแบบทดสอบ
5. นำผลที่ได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียน และแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มตัวอย่างไปวิเคราะห์หาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และนำผลที่ได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและแบบทดสอบหลังเรียน ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูล โดยการคำนวณค่าทางสถิติ ในการวิเคราะห์แบบทดสอบ การคำนวณค่าความยากง่าย (Difficulty Power) ค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ซึ่งสถิติในการวิเคราะห์ ข้อมูลดังนี้

1 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบทดสอบ

1.1 หาค่าความยากง่าย (Difficulty Power) และค่าอำนาจจำแนก

(Discrimination Power) ของแบบทดสอบ

1.2 หาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบทดสอบ

1.3 หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

2. การวัดความเที่ยงตรงของข้อสอบตามวัตถุประสงค์

3. การทดสอบความแตกต่างของคะแนนก่อนเรียนและคะแนนหลังเรียน

4. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) คือ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องตามชื่อเรื่อง
แผนงานวิจัย

ตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือ ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

สมมติฐานการวิจัย

1. บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน

2. หลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น นักศึกษามีความรู้เพิ่มมากขึ้น

นัยสำคัญที่ .05

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หน่วยงานของผู้วิจัยได้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนซึ่งผ่านการหาประสิทธิภาพแล้วทำให้ผู้ที่นำไปใช้ในการเรียนการสอนมีความมั่นใจว่า สามารถใช้ในการประกอบการเรียนในชั้นเรียนได้ตั้งแต่ปีการศึกษาที่ 2554

2. นักศึกษาสามารถใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนศึกษาก่อนเรียนในชั้นหรือทบทวนนอกเวลาได้

3. บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น ช่วยแก้ปัญหาในการจัดการเรียนการสอนของผู้วิจัย และอาจารย์ผู้สอนท่านอื่นๆ เรื่อง “รอยต่อการถ่ายทอดทางการศึกษา” ตลอดจนบุคลากรในหน่วยงานอื่น ๆ หรือองค์กรต่าง ๆ ที่นำไปใช้และทำให้เกิดประโยชน์ในการปฏิบัติงานยิ่งขึ้น

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งแยกกล่าว รายละเอียดเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์เนื้อหาเนื้อหาวิชา
2. การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
3. การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน
4. ความหมายคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
5. การหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การวิเคราะห์เนื้อหาวิชา

การวิเคราะห์เนื้อหา คือ การนำเอาเนื้อหาวิชาจากหลักสูตรมาแบ่งออกเป็นเรื่องย่อยๆ หรือหน่วยย่อยตามสมควร การแบ่งเนื้อหานี้พยายามแบ่งให้แต่ละตอนใหญ่ได้เล็กกันอาจจะสลับหัวข้อได้เพื่อให้มีความต่อเนื่องกัน หรือเนื้อหาตอนใดควรต่อเติมก็ทำได้ ข้อสำคัญคือไม่ควรมีการตัดทอนเนื้อหาของหลักสูตรให้น้อยลงไป (เสาวนีย์, 2528 : 105)

การวิเคราะห์เนื้อหาวิชา คือ การคัดเลือกเนื้อหาวิชา เพื่อให้ได้เนื้อหาวิชาที่เหมาะสมและสมบูรณ์ที่สุด เป็นการวิเคราะห์และสังเคราะห์เนื้อหาเพื่อจะนำมาใช้สอนในบทเรียนนั้น ๆ

(กฤษมันต์, 2540 17 – 23) ประกอบด้วย

1. ขอบเขตหรือความสมบูรณ์ของเนื้อหาวิชาเป็นการศึกษาสำรวจขอบเขตหรือเนื้อหาวิชาเกี่ยวข้องกันที่มีอยู่ในตำราหลาย ๆ เล่มและตำราที่นำมาใช้เลือกเพื่อศึกษานั้น ควรเป็นตำราที่ใหม่และทันสมัยเพื่อนำมาเปรียบเทียบและคัดเลือกเนื้อหาที่เหมาะสม

2. ความถูกต้องและความทันสมัยของเนื้อหาวิชา คือ การคัดเลือกเนื้อหาวิชาที่มีความเหมาะสมและถูกต้องมากที่สุด โดยพิจารณาลักษณะของเนื้อหาที่ก่อนเป็นอันดับแรก

3. การจัดลำดับของเนื้อหาวิชา คือ เนื้อหาวิชา ความรู้ หรือประสบการณ์ที่ส่งมาจากผู้ส่งไปถึงผู้รับอาจไม่เป็นที่เข้าใจของผู้รับได้ หรือเข้าใจได้อย่างยากลำบาก จึงต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขในการเข้าใจเนื้อหาวิชา ดังนี้

3.1 เนื้อหาวิชาหรือประสบการณ์ ต้องถูกย่อย หรือแยกเป็นส่วน ๆ ได้ โดยที่ผู้เรียนต้องเข้าใจเนื้อหาแต่ละส่วนนั้น

3.2 เนื้อหาวิชาหรือประสบการณ์ที่ย่อยแล้วนั้น ต้องเรียงลำดับอย่างเหมาะสม ซึ่งอาจถือหลักปฏิบัติได้ดังนี้ คือ

- 3.2.1 สอนจากง่ายไปหายาก
- 3.2.2 สอนจากสิ่งที่แลเห็นง่ายเป็นขั้นไปสู่ขั้นประกอบหลาย ๆ ส่วนอย่างยาก
- 3.2.3 สอนจากสิ่งที่พบเห็นทั่ว ๆ ไปไปสู่สิ่งเฉพาะพิเศษ หรือไปหาเหตุผล

- 3.2.4 สอนจากสิ่งที่รู้แล้วไปสู่สิ่งที่ยังไม่รู้
- 3.2.5 สอนจากสิ่งที่อยู่ใกล้ ไปสู่สิ่งที่อยู่ไกล ๆ
- 3.2.6 สอนจากสิ่งที่มีความชัดเจน ไปสู่สิ่งมโนภาพ
- 3.2.7 สอนให้เป็นที่ไปตามธรรมชาติของเด็ก
- 3.2.8 สอนให้ผู้เรียนเรียนรู้โดยผ่านประสาทสัมผัสทั้งห้า

การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนของผู้วิจัย มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาหรือเนื้อหาวิชา แบ่งขั้นตอนได้ดังนี้
 - ก) ศึกษาเนื้อหาวิชาหรือเนื้อหาเนื้อหาวิชาหัวข้อเรื่องงานวิจัยของผู้วิจัย ตามหลักสูตรระดับปริญญาตรี ที่เปิดสอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
 - ข) วิเคราะห์วัตถุประสงค์การสอน ในเนื้อหาวิชาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัยของผู้วิจัย ด้านความรู้ (Knowledge) ที่จำเป็นแล้วนำมาแบ่งบทเรียนและเขียนวัตถุประสงค์การสอน
 - ค) วิเคราะห์เนื้อหาเพื่อเลือกเนื้อหาให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ด้วยวิธีการ จัดเรียงลำดับเนื้อหาให้ตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

2. การสร้างชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ของผู้วิจัยมีขั้นตอนดังนี้

- ก) เตรียมเนื้อหาบทเรียน ตามหัวข้อเรื่องของผู้วิจัย
- ข) นำวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมและเนื้อหาของผู้วิจัยแต่ละท่านมาจัดแบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ
- ค) นำเนื้อหาบทเรียนมาทำบทเรื่อง(Scrip) ด้วยลักษณะคำบรรยายด้วยอักษร
- ง) นัดผู้ถ่ายทำวิดีโอเพื่อจัดทำเป็นชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ถ่ายทำตามบทเรื่อง
- จ) ผู้ถ่ายทำวิดีโอ ซึ่งผู้วิจัยเป็นผู้จัดจ้างให้ดำเนินการทำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนของผู้วิจัย นำวิดีโอที่ถ่ายทำแล้วไปดำเนินการสร้างโปรแกรมบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
- ฉ) นำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านสื่อ จำนวน 2 ท่าน ตรวจสอบแล้วปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำ
- ช) นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาและด้านการผลิตสื่อการสอน ประเมินคุณภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่พัฒนา

พิจารณาตามเกณฑ์การประเมินตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ จากผลของค่าเฉลี่ยที่ได้รับตามแนวทางของเบสท์ (Best) ดังนี้ (Best , 1983 : 179 – 187)

| ค่าเฉลี่ย | สรุปการประเมิน |
|-------------|----------------|
| 4.50 – 5.00 | ดีมาก |
| 3.50 – 4.49 | ดี |
| 2.50 – 3.49 | ใช้ได้ |
| 1.50 – 2.49 | ควรปรับปรุง |
| 1.00 – 1.49 | ใช้ไม่ได้ |

ข) นำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ที่สมบูรณ์แล้วไปใช้เก็บข้อมูลจริงจากกลุ่มทดลอง

การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1 วิเคราะห์เนื้อหาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัยของผู้วิจัยแต่ละท่าน
- 2 วิเคราะห์วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของเนื้อหาทั้งหมด
- 3 ศึกษาตำราและเอกสารเกี่ยวกับการวัดและการประเมินผลการศึกษาเพื่อใช้เป็นแนวทางการสร้างข้อสอบ และเขียนข้อสอบ

การสร้างข้อสอบ และเขียนข้อสอบ

- 4 สร้างแบบทดสอบที่ครอบคลุมเนื้อหาและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม
- 5 นำแบบทดสอบที่สร้างขึ้นให้ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาจำนวน 1 ท่าน ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้ข้อสอบที่มีความเที่ยงตรงตามเนื้อหาและด้านอื่น ๆ ที่มีผลต่อการวิจัย
- 6 นำแบบทดสอบ ที่ได้ปรับปรุงแก้ไขแล้วไปทดลอง (Tryout) กับนักเรียนระดับปริญญาตรีที่เปิดสอน ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความยากง่าย (Level of Difficult) และค่าอำนาจจำแนก (Discrimination Power) โดยถือเกณฑ์พิจารณา ดังนี้ ให้ข้อสอบมีค่าความยากง่าย (P) อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 และมีค่าอำนาจจำแนก(D) ตั้งแต่ 0.20 ขึ้นไป และการหาคุณภาพของแบบทดสอบทั้งฉบับ กลุ่มผู้วิจัยหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ (Reliability) โดยใช้สูตร คูเดอร์ ริชาร์ดสัน (Kuder Richardson Formular 20) (ล้วนและอังคณา ,2538 :198) เมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นแล้วนำมาดำเนินการเลือกข้อสอบที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว และนำมาหาค่าความเชื่อมั่นอีกครั้ง เมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นตามที่ต้องการแล้ว จึงนำข้อสอบชุดนี้ไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง โดยแบ่งข้อสอบออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกใช้เป็นแบบทดสอบก่อนเรียนและชุดที่สองเป็นแบบทดสอบหลังเรียนโดยครอบคลุมเนื้อหาวัตถุประสงค์ทั้งหมดแล้วนำแบบทดสอบชุดที่สองมาหาค่าความเชื่อมั่นอีกครั้ง

ความหมายคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

คอมพิวเตอร์ช่วยสอน หมายถึง สื่อการเรียนการสอนทางคอมพิวเตอร์รูปแบบหนึ่งซึ่งใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการนำเสนอสื่อประสม ได้แก่ ข้อความ ภาพนิ่ง กราฟฟิก แผนภูมิ กราฟ ภาพเคลื่อนไหว วีดิทัศน์และเสียง เพื่อถ่ายทอดเนื้อหาบทเรียนหรือองค์ความรู้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและโครงสร้างของเนื้อหา มีเป้าหมาย คือการได้มาซึ่งคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่ดึงดูดความสนใจของผู้เรียน และต้องการกระตุ้นผู้เรียนให้เกิดความต้องอยากเรียนรู้ ช่วยให้ผู้เรียนที่เรียนอ่อนสามารถใช้เวลา นอกเวลาเรียนในการฝึกฝนทักษะและเพิ่มเติมความรู้ เพื่อที่จะปรับปรุงการเรียนของตนให้ทันผู้เรียนอื่นได้ ดังนั้นผู้สอนจึงสามารถนำคอมพิวเตอร์ช่วยสอนไปใช้ช่วยในการสอนเสริม หรือสอนทบทวนการสอนปกติในชั้นเรียนได้ โดยที่ผู้สอนไม่จำเป็นต้องเสียเวลาในการสอนซ้ำกับผู้เรียนที่ตามไม่ทัน หรือจัดการสอนเพิ่มเติม ผู้เรียนสามารถนำคอมพิวเตอร์ช่วยสอนไปใช้ในการเรียนด้วยตนเองในเวลา และสถานที่ซึ่งผู้เรียนสะดวก สามารถเรียนในเวลาใดก็ได้ที่ต้องการ สามารถที่จะจูงใจผู้เรียน (Motivated) ที่จะเรียนและสนุกสนาน

ไปกับการเรียนตามแนวคิดของการเรียนรู้ในปัจจุบันที่เรียกว่า “Learning is Fun “ ซึ่งหมายถึง การเรียนรู้ เป็นเรื่องสนุก (ถนอมพร,2541:7-12)

การหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน สถิติที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยใช้สูตร (เสาวณีย์ , 2528 : 284)

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{M_2 - M_1}{P - M_1} + \frac{M_2 - M_1}{P}$$

M_1 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบก่อนการเรียน (Pre - test)

M_2 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบหลังการเรียน (Post - test)

P = คะแนนเต็มของข้อทดสอบ

ค่าของอัตราส่วนที่ได้จากสูตรนี้ จะมีค่าระหว่าง 0 – 2 ถ้าค่าที่หาออกมาได้มีค่ามากกว่า 1 ถือว่า บทเรียนคอมพิวเตอร์นั้นได้เกณฑ์มาตรฐาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การศึกษาในปัจจุบันมุ่งส่งเสริมผู้เรียนให้มีความรู้ในเนื้อหาวิชาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นจากอาจารย์ผู้สอนโดยตรงหรือจากการแสวงหาความรู้ด้วยตนเอง ซึ่งการมีสื่อการเรียนการสอนที่น่าสนใจเพื่อจะนำเสนอเนื้อหาต่าง ๆ นั้นจะช่วยดึงดูดความสนใจของผู้เรียน ในการค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมและช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจในเนื้อหาวิชานั้นดีขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีมาเพื่อพัฒนาสื่อการเรียนการสอน เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้สามารถติดต่อข่าวสารกันได้แทบทุกหนทุกแห่งในโลกมีการประดิษฐ์คิดค้นอุปกรณ์สื่อสารและสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้แล้วยังมีการประดิษฐ์คิดค้นสื่อการศึกษาใหม่ ๆ ออกสู่ท้องตลาดมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง คือ “คอมพิวเตอร์” และได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการศึกษากันอย่างแพร่หลาย (กรมการศึกษานอกโรงเรียน , 2541 : 2)

คอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ด้านการเรียนการสอน (Computer – Based Instruction) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ช่วยสอน (Computer - Assisted Instruction: CAI) และคอมพิวเตอร์ช่วยจัดการเรียนการสอน (Computer – Managed Instruction: CMI) ซึ่งจะแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้ในกิจกรรมของการเรียนการสอนทั้งหมด (กฤษมันต์, 2536:136)

สำโรง (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการฝึกปฏิบัติลับดอกส่วานด้วยมือ และเรื่องการฝึกปฏิบัติการกลิ้งงานชิ้นพื้นฐาน กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาแผนกเทคนิคอุตสาหกรรม ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่า ประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

พิเชฐ (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการฝึกปฏิบัติการทดสอบวัสดุในทางวิศวกรรม กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์

ช่วยสอน ได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ทินกร (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องฝึกปฏิบัติ ในงานวิชาโลหะวิทยา กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

บุญธรรม (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่อง ฝึกปฏิบัติในงานงานไม้ กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สิงห์แก้ว (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่อง การฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงอัตโนมัติ กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คมพันธ์ (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่อง การฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกัดอัตโนมัติ กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ประเสริฐ (2547) ได้สร้างและหาประสิทธิภาพ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการถอดประกอบปั๊มฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ผลการวิจัยปรากฏว่าประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนได้เกณฑ์มาตรฐาน 90/90 และหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

วิธีการวิจัย

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ซึ่งมีรายละเอียดการวิจัยดังนี้

1. ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้
2. กลุ่มตัวอย่าง
3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
4. การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล
5. การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้

การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผนการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยใช้แบบแผนการทดลองที่มีกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่มทำการทดสอบก่อนและทดสอบหลังการทดลองทันที (One – Group Pretest – Posttest Design) มีรูปแบบดังตารางที่ 1

| สอบก่อนเรียน | การทดลอง | สอบหลังเรียน |
|--------------|----------|--------------|
| T1 | X | T2 |

ตารางที่ 1 แสดงการทดลองที่มีกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่ม ทำการทดลองก่อนและหลังการทดลองทันที

เมื่อ X คือ การเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

T₁ คือ คะแนนสอบก่อนเรียน

T₂ คือ คะแนนสอบหลังเรียนทันที

กลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากร คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมที่เปิดสอน ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นนักศึกษานักศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนในวิชาหรือเนื้อหาวิชาตรงกับหัวข้องานวิจัยของผู้วิจัยในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 โดยจะทำการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงจำนวนนักศึกษาทั้งห้องเพื่อนำมาทดลองและใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนซึ่งมีอาจารย์ผู้สอนและผู้วิจัยควบคุม

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
 - 1.1 การวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาหรือเนื้อหาวิชาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย
 - ก) ศึกษาเนื้อหาวิชาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย ตามหลักสูตรปริญญาตรี สาขาช่างอุตสาหกรรมที่เปิดสอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ข) วิเคราะห์วัตถุประสงค์การสอนในเนื้อหาวิชาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัยด้านความรู้ที่จำเป็น โดยให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาเนื้อหาที่จะสอนเนื่องจากเนื้อหาเน้นทางทฤษฎีหรือปฏิบัติ แล้วนำมาแบ่งบทเรียนและเขียนวัตถุประสงค์การสอน

ค) วิเคราะห์เนื้อหาเพื่อเลือกเนื้อหาให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- จัดเรียงลำดับเนื้อหาให้ตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม
- นำเนื้อหาให้ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาจำนวน 2 ท่าน ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไข

1.2 การสร้างชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน มีขั้นตอนดังนี้

ก) เตรียมเนื้อหาบทเรียน ตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย

ข) นำวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมและเนื้อหา ตามหัวข้อเรื่องงานวิจัยมาจัดแบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ

ค) นำเนื้อหาบทเรียนมาทำบทเรื่อง (Scrip) ด้วยลักษณะคำบรรยายด้วยอักษร

ง) นัดผู้ถ่ายทำวิดีโอเพื่อจัดทำเป็นชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ถ่ายทำตามบทเรื่อง

จ) ผู้ถ่ายทำวิดีโอ ซึ่งผู้วิจัยเป็นผู้จัดจ้างให้ดำเนินการทำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย นำวิดีโอที่ถ่ายทำแล้วไปดำเนินการสร้างโปรแกรมบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

ฉ) นำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านสื่อ จำนวน 2 ท่าน ตรวจสอบแล้วปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำ

ช) การทดลองใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

การทดลองเพื่อศึกษาข้อบกพร่องต่าง ๆ ทางด้านเนื้อหา การดำเนินเรื่อง รูปภาพและภาษาที่ใช้ การเชื่อมโยงเสียงรวมถึงเวลาที่ใช้ในการเรียนการสอน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงแก้ไขกับนักศึกษาที่ไม่ใช่กลุ่มทดลอง

ซ) นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาและด้านการผลิตสื่อการสอน ประเมินคุณภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่พัฒนา

พิจารณาตามเกณฑ์การประเมินตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ จากผลของค่าเฉลี่ยที่ได้รับตาม แนวทางของเบสท์ (Best) ดังนี้ (Best, 1983 :179 –187)

| ค่าเฉลี่ย | สรุปการประเมิน |
|-------------|----------------|
| 4.50 – 5.00 | ดีมาก |
| 3.50 – 4.49 | ดี |
| 2.50 – 3.49 | ใช้ได้ |
| 1.50 – 2.49 | ควรปรับปรุง |
| 1.00 – 1.49 | ใช้ไม่ได้ |

ณ) นำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ตามหัวข้อเรื่องของผู้วิจัยแต่ละท่านที่สมบูรณ์แล้วไปใช้เก็บข้อมูลจริงจากกลุ่มทดลอง

2. การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

2.1 วิเคราะห์เนื้อหาตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย

2.2 วิเคราะห์วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของเนื้อหาทั้งหมด

2.3 ศึกษาตำราและเอกสารเกี่ยวกับการวัด และการประเมินผลการศึกษาเพื่อใช้เป็นแนวทางการสร้างข้อสอบ และเขียนข้อสอบ

2.4 สร้างแบบทดสอบ ที่ครอบคลุมเนื้อหาและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

2.5 นำแบบทดสอบที่สร้างขึ้นให้ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาจำนวน 2 ท่าน ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้ได้ข้อสอบที่มีความเที่ยงตรงตามเนื้อหาและด้านอื่น ๆ ที่มีผลต่อการวิจัย

2.6 นำแบบทดสอบที่ได้ปรับปรุงแก้ไขแล้วไปทดลอง (Tryout) กับนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาช่างอุตสาหกรรมที่เปิดสอน ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 จำนวนทั้งหมด ซึ่งกำลังเรียนวิชาหรือเนื้อหาตรงกับบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น เพื่อวิเคราะห์หาค่าความยากง่ายและค่าอำนาจจำแนก โดยถือเกณฑ์พิจารณา ดังนี้ ให้ข้อสอบมีค่าความยากง่าย (P) อยู่ระหว่าง 0.2–0.8 และมีค่าอำนาจจำแนก (D) ตั้งแต่ 0.20 ขึ้นไป และการหาคุณภาพของแบบทดสอบทั้งฉบับ ผู้วิจัยหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ โดยใช้สูตร คูเดอร์ ริชาร์ดสัน (Kuder Richardson Formular 20) (ลัคนและอังคณา, 2538:198) เมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นแล้ว นำมาดำเนินการเลือกข้อสอบที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว และนำมาหาค่าความเชื่อมั่นอีกครั้ง เมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นตามที่ต้องการแล้ว จึงนำข้อสอบชุดนี้ไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง โดยแบ่งข้อสอบออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกใช้เป็นแบบทดสอบก่อนเรียนและชุดที่สองเป็นแบบทดสอบหลังเรียน โดยครอบคลุมเนื้อหาวัตถุประสงค์ทั้งหมด แล้วนำแบบทดสอบชุดที่สองมาหาค่าความเชื่อมั่นอีกครั้ง

การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดการทดลองในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2553 ดังนี้

1. การเตรียมสถานที่ ใช้ห้องปฏิบัติการสอนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2. แจกแบบทดสอบให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบก่อนเรียน
3. ทำการสอนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย โดยมีอาจารย์ผู้สอน 1 ท่าน คือ ผู้ที่ทำวิจัยเป็นผู้สอน
4. แจกแบบทดสอบเดิมให้กลุ่มตัวอย่างทำอีกครั้ง
5. นำผลที่ได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียน และแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มตัวอย่างไปวิเคราะห์หาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และนำผลที่ได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและแบบทดสอบหลังเรียน ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูล โดยการคำนวณหาค่าทางสถิติ ในการวิเคราะห์แบบทดสอบ การคำนวณค่าความยากง่าย (Difficulty Power) ค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ซึ่งสถิติในการวิเคราะห์ ข้อมูลดังนี้

1 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบทดสอบ

1.1 หาค่าความยากง่าย (Difficulty Power) และค่าอำนาจจำแนก (Discrimination Power) ของแบบทดสอบ

สูตรหาค่าความยากง่ายของข้อสอบ (ล้วนและอังคณา , 2538 : 210 – 211)

$$P = \frac{R}{N}$$

เมื่อ P คือ ค่าความยากง่าย

R คือ จำนวนคนที่ทำข้อนั้นถูก

N คือ จำนวนคนที่ทำข้อนั้นทั้งหมด

โดยพิจารณาเลือกข้อสอบที่มีค่าความยากง่ายในช่วง 0.20 – 0.80

สูตรหาค่าอำนาจจำแนกของข้อสอบ (ล้วนและอังคณา , 2538 : 211)

$$D = \frac{R_U - R_L}{N/2}$$

เมื่อ D คือ ค่าอำนาจจำแนก

R_U คือ จำนวนนักเรียนที่ทำข้อนั้นถูกในกลุ่มเก่ง

R_L คือ จำนวนนักเรียนที่ทำข้อนั้นถูกในกลุ่มอ่อน

N คือ จำนวนนักเรียนในกลุ่มเก่งและกลุ่มอ่อน

โดยพิจารณาเลือกข้อสอบที่มีค่าอำนาจจำแนกตั้งแต่ 0.20 ขึ้นไป

1.2 หาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบทดสอบ

สูตรหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ โดยใช้สูตร KR⁻²⁰ (Kuder Richardson Formula 20) (ล้วนและอังคณา , 2538 : 198)

$$r_{tt} = \frac{n}{N - 1} \left[1 - \frac{S_{pq}}{S_t^2} \right]$$

เมื่อ r_{tt} คือ ความเชื่อมั่นของแบบทดสอบทั้งฉบับ

N คือ จำนวนข้อของเครื่องมือวัด

p คือ สัดส่วนของผู้ทำได้ในข้อหนึ่ง ๆ นั่นคือสัดส่วนของคนทำถูก กับคน ทั้งหมด

q คือ สัดส่วนของผู้ที่ทำผิดในข้อหนึ่ง ๆ หรือ คือ 1 - p
 S_t^2 คือ คะแนนความแปรปรวนของเครื่องมือทั้งฉบับ

1.3 หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (ล้วนและอังกฤษ , 2538 : 73)

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

เมื่อ \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของคะแนน
 $\sum X$ คือ ผลรวมของคะแนนทั้งหมด
 N คือ จำนวนผู้เข้าสอบ

2. การวัดความเที่ยงตรงของข้อสอบตามวัตถุประสงค์

สูตรการวัดความเที่ยงตรงตามวัตถุประสงค์ โดยใช้สูตร Rovinell and Hambeton (กังวล , 2536 : 185 – 186)

$$O.V. = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

เมื่อ O.V. คือ ความเที่ยงตรงตามวัตถุประสงค์
 n คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ
 X คือ ความตรงตามวัตถุประสงค์ มีค่าเป็น + 1, 0 และ -1
 โดยพิจารณาเลือกข้อสอบที่มีค่าความเที่ยงตรงของวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป

3. การทดสอบความแตกต่างของคะแนนก่อนเรียนและคะแนนหลังเรียน

ใช้โปรแกรมทดสอบ Pre – Post test ของโปรแกรม Excel ที่นัยสำคัญ 0.05

4. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

สถิติที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยใช้สูตร (เสาวณีย์ , 2528 : 284)

$$\text{ประสิทธิภาพ } \eta = \frac{M_2 - M_1}{P - M_1} + \frac{M_2 - M_1}{P}$$

M_1 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบก่อนการเรียน (Pre - tese)

M_2 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบหลังการเรียน (Post - test)

P = คะแนนเต็มของข้อทดสอบ

ค่าของอัตราส่วนที่ได้จากสูตรนี้ จะมีค่าระหว่าง 0-2 ถ้าค่าที่หาออกมาได้มีค่ามากกว่า 1 ถือว่า บทเรียนคอมพิวเตอร์นั้นได้เกณฑ์มาตรฐาน



ผลของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนการสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ตามหัวข้อเรื่องงานวิจัย สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

1. การวิเคราะห์หาค่าความคิดเห็นของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนจากผู้เชี่ยวชาญ
2. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
3. การวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ปรากฏผลดังนี้

- 1 การวิเคราะห์หาค่าความคิดเห็นของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนจากผู้เชี่ยวชาญ

| ผู้เชี่ยวชาญ | จำนวน (คน) | \bar{X} | ระดับความคิดเห็น |
|-----------------------|--------------|-----------|------------------|
| ด้านเนื้อหา | 2 | 5.00 | ดีมาก |
| ด้านการผลิตสื่อการสอน | 2 | 5.00 | ดีมาก |

ตารางที่ 2 แสดงค่าความคิดเห็นของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนจากผู้เชี่ยวชาญ

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีค่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทางด้านเนื้อหาอยู่ที่ระดับ 5.00 และค่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทางด้านการผลิตสื่ออยู่ที่ระดับ 5.00 สรุปได้ว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นว่บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ทั้งทางด้านเนื้อหาและทางด้านการผลิตสื่อการสอน

2. การหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

สถิติที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยใช้สูตร (เสาวณีย์ , 2528 : 284)

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{M_2 - M_1}{P - M_1} + \frac{M_2 - M_1}{P}$$

M_1 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบก่อนการเรียน (Pre - tese)

M_2 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบหลังการเรียน (Post - test)

P = คะแนนเต็มของข้อทดสอบ

ค่าของอัตราส่วนที่ได้จากสูตรนี้ จะมีค่าระหว่าง 0-2 ถ้าค่าที่หาออกมาได้มีค่ามากกว่า 1 ถือว่า บทเรียนคอมพิวเตอร์นั้นได้เกณฑ์มาตรฐาน

$$\text{แทนค่า } M_1 = 12.769$$

$$M_2 = 25.038$$

$$P = 30$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ } \gamma &= \frac{25.038 - 12.769}{30 - 12.769} + \frac{25.038 - 12.769}{30} \\ &= 0.712 + 0.408 \\ &= 1.12 \end{aligned}$$

ค่าที่ได้ = 1.12 ดังนั้นบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ได้เกณฑ์มาตรฐาน

3. การวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน หลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน การวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของ เอกซ์เซล (Excel) ปรากฏผลดังนี้ ผู้เรียนมีความรู้เพิ่มขึ้นจริงเชื่อได้ 95 % หรือนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน มีความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาอยู่ที่ระดับ 5.00 และด้านการผลิตสื่อการสอนอยู่ที่ระดับ 5.00 ถือว่าอยู่ในระดับดีมาก
2. ประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้นได้เกณฑ์มาตรฐาน
3. หลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิศวกรรมศาสตร์ เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในการวิจัย คือ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นและแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนในการวิจัยนี้ เริ่มต้นจากศึกษาหลักสูตรและข้อมูลต่าง ๆ การวิเคราะห์เนื้อหา การกำหนดวัตถุประสงค์ การสร้างแบบทดสอบ การสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยเก็บบันทึกไว้ในแผ่นซีดีรอมจำนวน 2 แผ่น การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น ใช้เกณฑ์การหาค่าประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ของกลุ่มตัวอย่างที่เรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เมื่อทำแบบทดสอบก่อนเรียน และหลังเรียนด้วยแบบทดสอบด้วยผลสัมฤทธิ์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น และผ่านการวิเคราะห์ข้อสอบแล้ว โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์การทดสอบความแตกต่างของคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน (t-test : One – Group Pretest – Posttest)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น
3. เพื่อวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

สมมติฐานการวิจัย

1. บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน
2. หลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น นักศึกษามีความรู้เพิ่มมากขึ้นกว่าก่อนเรียน

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ดังนี้

1. บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน มีค่าความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาอยู่ที่ระดับ 5.00 และด้านการผลิตสื่อการสอนอยู่ที่ระดับ 5.00 ถือว่าอยู่ในระดับดีมาก
2. ประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ได้เกณฑ์มาตรฐาน
3. หลังจากเรียนด้วยบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน นักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

บรรณานุกรม

การุณ ชนะชัย, “13-Test for Different of Continuous Data”

<<http://www.dld.go.th/dcontrol/04Knowledge/Reserchperson/measring5Nov07/13-Test%20for%20Different%20of%20Continuous%20Data.pdf>>

กั้ววล เทียนกัณฑ์เทศน์. 2540. **การวัด การวิเคราะห์ การประเมินทางการศึกษาเบื้องต้น.**

กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.

กฤษมันต์ วัฒนานางรงค์. 2536. **เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา.** กรุงเทพมหานคร: ภาควิชา
ครุศาสตร์เทคโนโลยี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.

กรมการศึกษานอกโรงเรียน. กระทรวงศึกษาธิการ. 2541. **วิจัยความต้องการบทเรียน**

คอมพิวเตอร์ช่วยสอน. กรุงเทพมหานคร: บริษัทศูนย์การพิมพ์แก่นจันทร์ จำกัด.

คมพันธ์ ชมสมุทร. 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง
เรื่องการฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงอัตโนมัติ. “ งานวิจัย สาขาวิชาเครื่องจักรอัตโนมัติ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .

จันทร์ตน์ วรสรรพวิทย, “การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Excel ในการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่”

www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla_5_2550_pair_t-test.pdf

โตศักดิ์ ทัศนานุกริยะ.2540. **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.** กรุงเทพฯ.บริษัทยูเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.

ถนอมพร เลหาจรัสแสง. 2541. **คอมพิวเตอร์ช่วยสอน.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาโสตทัศนศึกษา
คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทินกร จันทร์กระจ่าง . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง
การฝึกปฏิบัติในงานโลหะวิทยา. “ งานวิจัย สาขาวิชาช่างโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .

บุญธรรม พ่วงลา . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง
การฝึกปฏิบัติในงานไม้. “ งานวิจัย สาขาวิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .

ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง
การถอดประกอบปั๊มฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ดีเซล. “ งานวิจัย สาขาวิชาเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .

- พิเชษฐ จิระประเสริฐวงศ์ . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง การฝึกปฏิบัติการทดสอบวัสดุในทางวิศวกรรม.”งานวิจัยสาขาช่างโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .
- ล้วน สายยศ. และ อังคณา สายยศ. 2538 **เทคนิคการวิจัยทางการศึกษา**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.
- สิงห์แก้ว ปือกเท็ง . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง เรื่องการฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกัดอัตโนมัติ.” งานวิจัย สาขาวิชาเครื่องจักรอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .
- สำเร็จ แผงศรี . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง การฝึก ปฏิบัติลับดอกสว่านด้วยมือ.” งานวิจัย สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .
- สำเร็จ แผงศรี . 2547. “ การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง การฝึก ปฏิบัติการกลึงงานขั้นพื้นฐาน.” งานวิจัย สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร .
- เสาวณีย์ สิกขาบัณฑิต. 2528. **เทคโนโลยีทางการศึกษา**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Best , John W .1983. **Research in Education** . 4th ed. Englewood Cliffs , New Jersey : Practice Hall , Inc .
- Gagne , R et al. 1988. **Principles of Instruction Design**. New York, NY : The Dryden Press.

ภาคผนวก





บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ

ที่

วันที่ 7 มิถุนายน 2553

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบการสอบด้านเทคนิคการผลิตในโครงการวิจัยของมหาวิทยาลัย ฯ

เรียน อาจารย์มนต์ชัย นรเศรษฐ์สิงห์

ตามที่โครงการวิจัยการสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ปีงบประมาณ 2553 ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการ ผู้วิจัยได้ปรึกษาผู้บริหารแผนกวิจัยและฝึกอบรมแล้วว่าอาจารย์มนต์ชัย นรเศรษฐ์สิงห์ มีคุณสมบัติเหมาะสมในการเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบการสอบด้านเทคนิคการผลิต เพื่อประกอบในการดำเนินโครงการวิจัยดังกล่าว

จึงเรียนมาเพื่อโปรดให้ความอนุเคราะห์ด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิวัฒน์ ฉลาดสกุล)

ผู้วิจัย



บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ

ที่

วันที่ 7 มิถุนายน 2553

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสื่อการสอนด้านเนื้อหาของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน
ในโครงการวิจัยของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรียน อาจารย์บรรพต ชุนจันทร์

ตามที่โครงการวิจัยการสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ปีงบประมาณ 2553 ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการ ผู้วิจัยได้ปรึกษาฝ่ายวิจัยและฝึกอบรมพิจารณาแล้วว่าอาจารย์บรรพต ชุนจันทร์ มีคุณสมบัติเหมาะสม ในการเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสื่อการสอนด้านเนื้อหาของบทเรียนคอมพิวเตอร์โครงการวิจัย ประกอบในการดำเนินโครงการวิจัยดังกล่าว

จึงเรียนมาเพื่อโปรดให้ความอนุเคราะห์ด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล)

ผู้วิจัย

ขอข่าของเนื้อหาวิชา

ขอข่าของเนื้อหาวิชา เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6
2. เพื่อหาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนที่สร้างขึ้น



แบบประเมินสื่อการสอนด้านเนื้อหา

บทเรียนคอมพิวเตอร์ เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

บทเรียนคอมพิวเตอร์ที่ท่านกำลังประเมินอยู่นี้ มีคุณภาพอยู่ในระดับใดโปรดทำเครื่องหมาย ลงใน

ช่องบอกระดับคุณภาพเพียงช่องเดียวตามความคิดเห็นของท่าน

1. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่าควรมีการปรับปรุง
2. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมพอใช้
3. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมปานกลาง
4. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมดี
5. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมดีมาก

| เรื่องที่จะประเมิน | ระดับความคิดเห็น | | | | | หมายเหตุ |
|---|------------------|------|------|------|------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1. เนื้อหาและการดำเนินเรื่อง | | | | | | |
| 1.1 เนื้อหา มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรม..... | | | | | | |
| 1.2 ความชัดเจนถูกต้องของเนื้อหา | | | | | | |
| 1.3 ความเหมาะสมในรูปแบบและวิธีการนำเสนอ | | | | | | |
| 2. ภาพ | | | | | | |
| 2.1 คุณภาพของภาพ | | | | | | |
| 2.2 ความเหมาะสมของภาพในการสื่อความหมาย..... | | | | | | |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างภาพกับเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 2.4 ความเหมาะสมของเทคนิคสร้างภาพในบทเรียน..... | | | | | | |
| 2.5 ความเหมาะสมของงานด้านกราฟฟิก | | | | | | |
| 3. เสียงและภาษา | | | | | | |
| 3.1 ความเหมาะสมของเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 3.2 ความชัดเจนของเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 3.3 ความถูกต้องของการใช้ภาษา | | | | | | |
| 4. เวลา | | | | | | |
| 4.1 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหาในภาพ..... | | | | | | |
| 4.2 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหาคำบรรยาย | | | | | | |
| 4.3 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอทั้งเรื่อง..... | | | | | | |

ความคิดเห็นเรื่องอื่น ๆ

.....

.....

.....

ลงชื่อ ผู้ประเมิน

(.....)

...../...../.....

แบบประเมินสื่อการสอนด้านเทคนิคการผลิตสื่อ

บทเรียนคอมพิวเตอร์ เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

บทเรียนคอมพิวเตอร์ที่ท่านกำลังประเมินอยู่นี้ มีคุณภาพอยู่ในระดับใดโปรดทำเครื่องหมาย ลงใน

ช่องบอกระดับคุณภาพเพียงช่องเดียวตามความคิดเห็นของท่าน

1. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่าควรมีการปรับปรุง
2. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมพอใช้
3. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมปานกลาง
4. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมดี
5. หมายถึง ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับสื่อว่ามีความถูกต้องชัดเจนหรือเหมาะสมดีมาก

| เรื่องที่จะประเมิน | ระดับความคิดเห็น | | | | | หมายเหตุ |
|---|------------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1. เนื้อหาและการดำเนินเรื่อง | | | | | | |
| 1.1 เนื้อหา มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรม..... | | | | | | |
| 1.2 ความชัดเจนถูกต้องของเนื้อหา | | | | | | |
| 1.3 ความเหมาะสมในรูปแบบและวิธีการนำเสนอ | | | | | | |
| 2. ภาพ | | | | | | |
| 2.1 คุณภาพของภาพ | | | | | | |
| 2.2 ความเหมาะสมของภาพในการสื่อความหมาย..... | | | | | | |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างภาพกับเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 2.4 ความเหมาะสมของเทคนิคสร้างภาพในบทเรียน..... | | | | | | |
| 2.5 ความเหมาะสมของงานด้านกราฟฟิก | | | | | | |
| 3. เสียงและภาษา | | | | | | |
| 3.1 ความเหมาะสมของเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 3.2 ความชัดเจนของเสียงบรรยาย | | | | | | |
| 3.3 ความถูกต้องของการใช้ภาษา | | | | | | |
| 4. เวลา | | | | | | |
| 4.1 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหาในภาพ..... | | | | | | |
| 4.2 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหาคำบรรยาย | | | | | | |
| 4.3 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอทั้งเรื่อง..... | | | | | | |

ความคิดเห็นเรื่องอื่น ๆ

.....

.....

.....

ลงชื่อ ผู้ประเมิน
 (.....)
/...../.....

เกณฑ์การประเมินสื่อการสอน

การประเมินความคิดเห็นจากการตอบแบบสอบถาม จากผู้เชี่ยวชาญด้วยหาค่าเฉลี่ยของข้อคำถามแต่ละข้อ แล้วหาผลรวมของค่าเฉลี่ยของแบบสอบถามทั้งฉบับ แล้วแปลความหมายของผลรวมค่าเฉลี่ยเพื่อหาเกณฑ์ค่าเฉลี่ยของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

ในการแปลความหมายของค่าเฉลี่ยของการตอบแบบสอบถามตามช่วงของค่าเฉลี่ยความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญตามแนวทางของเบสท์ (Best) ดังนี้ ค่าเฉลี่ยตั้งแต่

- 4.50 – 5.00 หมายถึง ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าข้อคำถามนั้นอยู่ในเกณฑ์ดีมาก
- 3.50 – 4.49 หมายถึง ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าข้อคำถามนั้นอยู่ในเกณฑ์ดี
- 2.50 – 3.49 หมายถึง ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าข้อคำถามนั้นอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้
- 1.50 – 2.49 หมายถึง ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าข้อคำถามนั้นอยู่ในเกณฑ์ควรปรับปรุง
- 1.00 – 1.49 หมายถึง ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นว่าข้อคำถามนั้นอยู่ในเกณฑ์ใช้ไม่ได้



ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเนื้อหา

| เรื่องที่จะประเมิน | ผู้ประเมินเรียงตาม รายชื่อ | | | | \bar{X} |
|--|-------------------------------|---|---|---|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1. เนื้อหาและการดำเนินเรื่อง | | | | | |
| 1.1 เนื้อหา มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรม | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.2 ความถูกต้องของเนื้อหา | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.3 ความถูกต้องในการลำดับเนื้อหาตามขั้นตอน | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.4 ความสอดคล้องของเนื้อหาแต่ละตอน | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.5 ความชัดเจนในการอธิบายเนื้อหา | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.6 ความเหมาะสมกับระดับผู้เรียน | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2. รูปภาพและภาษา | | | | | |
| 2.1 ความถูกต้องของรูปภาพตามเนื้อหา..... | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.2 ความถูกต้องของภาษาที่ใช้ | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.3 ความสอดคล้องระหว่างรูปภาพกับคำบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3. เวลาในการนำเสนอ | | | | | |
| 3.1 ความเหมาะสมของเวลานำเสนอกับเนื้อหาในภาพ ... | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3.2 ความเหมาะสมของเวลานำเสนอกับเนื้อหาคำบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3.3 ความเหมาะสมของเวลาที่นำเสนอทั้งเรื่อง | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| \bar{X} | 5 | 5 | - | - | 5.0 |

ตารางที่ 3 ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเนื้อหา

ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อ

| เรื่องที่จะประเมิน | ผู้ประเมินเรียงตาม | | | | — X |
|---|--------------------|---|---|---|--------|
| | รายชื่อ | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1. เนื้อหาและการดำเนินเรื่อง | | | | | |
| 1.1 เนื้อหา มีความสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรม | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.2 ความชัดเจนถูกต้องของเนื้อหา | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 1.3 ความเหมาะสมในรูปแบบและวิธีนำเสนอ | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2. ภาพ | | | | | |
| 2.1 คุณภาพของภาพ | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.2 ความเหมาะสมของภาพในการสื่อความหมาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างภาพกับเสียงบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.4 ความเหมาะสมของเทคนิคสร้างภาพในบทเรียน | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 2.5 ความเหมาะสมของงานด้านกราฟฟิก | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3. เสียงและภาษา | | | | | |
| 3.1 ความเหมาะสมของเสียงบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3.2 ความชัดเจนของเสียงบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 3.3 ความถูกต้องของการใช้ภาษา | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 4. เวลา | | | | | |
| 4.1 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหาในภาพ | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 4.2 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอกับเนื้อหา คำบรรยาย | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| 4.3 ความเหมาะสมของเวลาการนำเสนอทั้งเรื่อง | 5 | 5 | - | - | 5.0 |
| \bar{X} | 5 | 5 | - | - | 5.0 |

ตารางที่ 4 ผลการประเมินสื่อการสอนจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านเทคนิคการผลิตสื่อ

แสดงผลการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์

| ข้อ | ผู้เชี่ยวชาญประเมิน | | ผลค่า O.V. | ข้อ | ผู้เชี่ยวชาญประเมิน | | ผลค่า O.V. |
|-----|---------------------|---------|---------------|-----|---------------------|---------|---------------|
| | คนที่ 1 | คนที่ 2 | | | คนที่ 1 | คนที่ 2 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 21 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 22 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 23 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 24 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 25 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 26 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 27 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 28 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 29 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 30 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 12 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 13 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 14 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 15 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 16 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 17 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 18 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 19 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 20 | 1 | 1 | 1 | | | | |

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของแบบทดสอบกับวัตถุประสงค์

สรุปผล แบบทดสอบเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

ทุกข้อตรงวัตถุประสงค์การสอน

แสดงผลการประเมิน หาค่าความยากง่ายของแบบทดสอบ เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

ระดับปริญญาตรี ประจำปีการศึกษา 1/2553

| ที่ | รหัส | ข้อทดสอบที่ (30 ข้อ) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | รวม 30 |
|-----|------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
| 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 13 |
| 2 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 12 |
| 3 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 18 |
| 5 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 17 |
| 6 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 |
| 7 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 20 |
| 8 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 14 |
| 9 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| 10 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | |
| 11 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 16 |
| 12 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| 13 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 12 |
| 14 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 12 |
| 15 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 10 |
| 16 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 12 |
| 17 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 5 |
| 18 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| 19 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 |
| 20 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 12 | |
| 21 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 7 |
| 22 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 |

ตารางที่ 6 แสดงผลการประเมินหาค่าความยากง่ายของแบบทดสอบเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 23 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 | | |
| 24 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 |
| 25 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 |
| 26 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| | รวมคะแนนรายข้อ (R) | 6 | 7 | 18 | 12 | 7 | 10 | 6 | 6 | 10 | 10 | 8 | 5 | 7 | 9 | 14 | 12 | 14 | 9 | 6 | 9 | 7 | 6 | 10 | 6 | 6 | 6 | 19 | 11 | 10 | 18 |
| | ค่าความยากง่าย (0.2 - 0.8) | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 0.4 | 0.4 | 0.7 |

ตารางที่ 6 แสดงผลการประเมินหาค่าความยากง่ายของแบบทดสอบเรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

พิจารณาข้อสอบที่มีค่า ความยากง่าย = 0.2 - 0.8

หมายเหตุ

ช่องคะแนน 0 = ทำผิด

ช่องคะแนน 1 = ทำถูก

สูตร ค่าความยากง่าย $P = R / N$

R = จำนวนคนที่ทำถูก

N = จำนวนคนทั้งหมด = 26 คน

แสดงผลค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ

ระดับปริญญาตรี ประจำปีการศึกษา 1 / 2553

| รายการ | ข้อทดสอบที่ (30 ข้อ) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| รวมคะแนนรายข้อ(RU) | 3 | 3 | 7 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 6 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 |
| รวมคะแนนรายข้อ(RL) | 1 | 1 | 5 | 3 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 5 | 3 | 3 | 5 |
| N / 2 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| ค่าอำนาจจำแนก (D) | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

ตารางที่ 10 แสดงผลค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ

สูตร ค่าอำนาจจำแนก = $\frac{RU - RL}{N / 2}$

พิจารณาข้อสอบที่มี ค่าอำนาจจำแนก ตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไป

สรุป แบบทดสอบที่ใช้ในการวิจัยทุกข้อ มีค่าตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไป

ตารางที่ 12 แสดงค่า T-test ของแบบทดสอบ เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6
ระดับปริญญาตรี ประจำปีการศึกษา 1 / 2553

| ที่ | รหัส | Pre-test | Post-test |
|-----|------|----------|-----------|
| 1 | | 10 | 26 |
| 2 | | 11 | 20 |
| 3 | | 14 | 26 |
| 4 | | 10 | 26 |
| 5 | | 10 | 25 |
| 6 | | 13 | 22 |
| 7 | | 18 | 26 |
| 8 | | 14 | 23 |
| 9 | | 13 | 28 |
| 10 | | 13 | 26 |
| 11 | | 14 | 27 |
| 12 | | 12 | 25 |
| 13 | | 11 | 23 |
| 14 | | 14 | 22 |
| 15 | | 14 | 27 |
| 16 | | 14 | 27 |
| 17 | | 14 | 23 |
| 18 | | 10 | 25 |
| 19 | | 14 | 25 |
| 20 | | 16 | 27 |
| 21 | | 16 | 26 |
| 22 | | 14 | 25 |
| 23 | | 10 | 26 |
| 24 | | 13 | 26 |
| 25 | | 10 | 23 |
| 26 | | 10 | 26 |

ตารางที่ 12 แสดงค่า T-test ของแบบทดสอบ เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

ผลการคำนวณหาค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ

เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6

$$S_{pq} = 6.1 \quad , \quad S_X = 284 \quad , \quad S_X^2 = 3,552$$

$$\begin{aligned} \text{คำนวณค่า } S_t^2 &= \frac{N S_X^2 - (S_X)^2}{N^2} \\ &= \frac{26 \times 3,552 - (284)^2}{26 \times 26} \\ &= 17.30 \end{aligned}$$

$$\text{จาก } r_{tt} = \frac{n}{n-1} \left[1 - \frac{S_{pq}}{S_t^2} \right]$$

- เมื่อ
- r_{tt} คือ ความเชื่อมั่นของแบบทดสอบทั้งฉบับ
 - N คือ จำนวนข้อของเครื่องมือวัด
 - p คือ สัดส่วนของผู้ทำได้ในข้อหนึ่ง ๆ นั่นคือ สัดส่วนของคนทำถูกกับคนทั้งหมด
 - q คือ สัดส่วนของผู้ที่ทำได้ในข้อหนึ่ง ๆ หรือ คือ $1-p$
 - S_t^2 คือ คะแนนความแปรปรวนของเครื่องมือทั้งฉบับ

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } r_{tt} &= \frac{30}{30-1} \left[1 - \frac{6.1}{17.30} \right] = 0.67 \end{aligned}$$

ดังนั้นแบบทดสอบฉบับนี้ มีความเชื่อมั่น = 0.67

ผลการคำนวณวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน

สถิติที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยใช้สูตร (เสาวณีย์ , 2528 : 284)

$$\text{ประสิทธิภาพ } \eta = \frac{M_2 - M_1}{P - M_1} + \frac{M_2 - M_1}{P}$$

M_1 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบก่อนการเรียน (Pre - tese)

M_2 = ผลของคะแนนเฉลี่ยจากการสอบหลังการเรียน (Post - test)

P = คะแนนเต็มของข้อทดสอบ

ค่าของอัตราส่วนที่ได้จากสูตรนี้ จะมีค่าระหว่าง 0-2 ถ้าค่าที่หาออกมาได้มีค่ามากกว่า 1 ถือว่า บทเรียนคอมพิวเตอร์นั้นได้เกณฑ์มาตรฐาน

แทนค่า $M_1 = 15.038$

$M_2 = 23.923$

$P = 30$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ } \eta &= \frac{23.923 - 15.038}{30 - 15.038} + \frac{23.923 - 15.038}{30} \\ &= 0.593 + 1.298 \\ &= 1.891 \end{aligned}$$

ค่าที่ได้ = 1.891 ดังนั้นบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังบทที่ 3-6 ได้เกณฑ์มาตรฐาน

ลักษณะรายวิชา

04-112-311 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

3(3-0-6)

Electric Power System Analysis

รายวิชาที่ต้องเรียนมาก่อน : 04-112-205 ระบบไฟฟ้ากำลัง

รายวิชาที่ต้องเรียนควบคู่ : -

ศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณโครงข่ายการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้า โหลดเฟลว การควบคุมโหลดเฟลว การวิเคราะห์ฟลลท์แบบสมมาตรและไม่สมมาตร การป้องกันระบบไฟฟ้าเสถียรภาพชั่วขณะ การทำงานอย่างประหยัดของระบบไฟฟ้ากำลัง การวัดความสัมพันธ์ของการขนวน ระบบสายดิน



การศึกษาการไหลของโหลด

ก่อนที่จะเข้าถึงรายละเอียดในการศึกษาการไหลของโหลด (load flow studies) เราลองมาทำความเข้าใจกับความหมายของคำว่า การไหลของโหลดกันก่อน ในความเป็นจริงโหลดที่กระจายอยู่ทั่วระบบไฟฟ้ากำลังไม่ได้มีการไหลหรือเคลื่อนที่ไปไหน แต่โหลดที่อยู่กับที่เหล่านี้ต้องการกำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงาน ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตซึ่งก็คือ โรงจักรไฟฟ้าไปสู่โหลดในพื้นที่ต่างๆ แต่การก่อสร้างโรงจักรไฟฟ้าก็มิได้อยู่หลายพื้นที่ด้วยกัน และมีการต่อเชื่อมถึงกันด้วยสายส่งจึงสามารถช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้อย่างเพียงพอ กับความต้องการของโหลด ด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลไปสู่โหลดได้ทั่วทั้งระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมถึงกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้านั่นเอง

การศึกษาการไหลของโหลดเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะทางด้านปฏิบัติการ ควบคุม และวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการประเมินสมรรถนะของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบ และศึกษาผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุปกรณ์ในระบบ เช่น เมื่อระบบไฟฟ้ามีโหลดเพิ่มขึ้นก็จะเกิดการต่อเชื่อมโหลดใหม่ หรือติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและก่อสร้างสายส่งพลังไฟฟ้าขึ้นใหม่เข้ากับระบบเดิม จึงทำให้มีผลกระทบต่อแรงดันและกระแสของระบบ อีกทั้งยังมีผลต่อการไหลของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟด้วย ซึ่งผลกระทบเหล่านี้จำเป็นจะต้องมีการศึกษาก่อนเพื่อจะได้ดำเนินงานดังกล่าวข้างต้นให้มีความถูกต้อง



จุดมุ่งหมายของการคำนวณการไหลของโหลดก็เพื่อที่จะหาคุณลักษณะการทำงานในสภาวะต่าง ๆ ของระบบการผลิตและระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้าให้กับโหลด โดยผลที่จะได้รับการคำนวณการไหลของโหลดจะประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดแรงดันและมุมเฟสที่บัสต่างๆ
2. การไหลของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในสายส่งแต่ละวงจร
3. กำลังสูญเสียของระบบ

ปัญหาการไหลของโหลดจะสร้างมาจากการแทนวงจรของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น (linear equation) โดยมีวิธีแก้ปัญหาของสมการเชิงเส้นได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อการศึกษาปัญหาการไหลของโหลดกันอย่างแพร่หลายคือ วิธีไอเทอเรทีฟของเกาส์ (gauss iterative method) และวิธีไอเทอเรทีฟของเกาส์-ไซเดล (gauss-seidel iterative method) นอกจากนี้การไหลของโหลดที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มของสมการไม่เชิงเส้น (nonlinear equation) ก็สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน (newton-raphson method)

3.1 วิธีไอเทอเรทีฟของเกาส์ (Gauss Iterative Method)

กำหนดให้สมการเชิงเส้น n สมการที่มีตัวแปรอิสระ (independent variables) อยู่ n ตัว (x_1, x_2, \dots, x_n) เมื่อ a เป็นสัมประสิทธิ์ (coefficients) และ y เป็นตัวแปรตาม (dependent variables) ที่ทราบค่า ดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + \dots + a_{1n} x_n &= y_1 \\ a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + \dots + a_{2n} x_n &= y_2 \\ \dots &\dots \\ a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + a_{n3} x_3 + \dots + a_{nn} x_n &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างคือ

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{a_{11}} (y_1 - a_{12} x_2 - a_{13} x_3 - \dots - a_{1n} x_n) \\ x_2 &= \frac{1}{a_{22}} (y_2 - a_{21} x_1 - a_{23} x_3 - \dots - a_{2n} x_n) \\ \dots &\dots \\ x_n &= \frac{1}{a_{nn}} (y_n - a_{n1} x_1 - a_{n2} x_2 - \dots - a_{n,n-1} x_{n-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ขั้นตอนที่เกี่ยวกับการสมมติค่าเริ่มต้นสำหรับแต่ละตัวแปรอิสระ $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ เมื่อ (0) กำกับไว้เพื่อบอกว่าเป็นการประมาณค่าเริ่มต้น ซึ่งส่วนใหญ่แล้วค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้คือ

$$x_1^{(0)} = y_1/a_{11}, x_2^{(0)} = y_2/a_{22}, \dots, x_n^{(0)} = y_n/a_{nn} \quad (3.3)$$

นำค่าตัวเลขที่ได้จากสมการที่ (3.3) แทนลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(1)} &= \frac{1}{a_{11}} (y_1 - a_{12} x_2^{(0)} - a_{13} x_3^{(0)} - \dots - a_{1n} x_n^{(0)}) \\ x_2^{(1)} &= \frac{1}{a_{22}} (y_2 - a_{21} x_1^{(0)} - a_{23} x_3^{(0)} - \dots - a_{2n} x_n^{(0)}) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n^{(1)} &= \frac{1}{a_{nn}} (y_n - a_{n1} x_1^{(0)} - a_{n2} x_2^{(0)} - \dots - a_{n, n-1} x_{n-1}^{(0)}) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

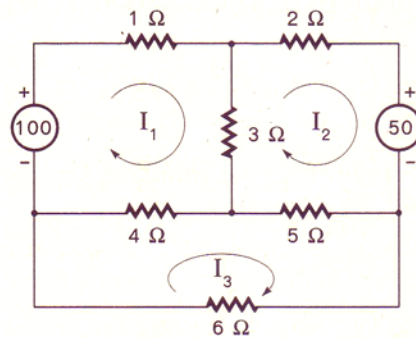
ผลจากค่าใหม่นี้ $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ จะนำไปแทนค่าในไอเทอเรนซ์ข้างหน้า (next iteration) ต่อไป ดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปสำหรับไอเทอเรนซ์ที่ k ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} x_1^{(k)} &= \frac{1}{a_{11}} (y_1 - a_{12} x_2^{(k-1)} - a_{13} x_3^{(k-1)} - \dots - a_{1n} x_n^{(k-1)}) \\ x_2^{(k)} &= \frac{1}{a_{22}} (y_2 - a_{21} x_1^{(k-1)} - a_{23} x_3^{(k-1)} - \dots - a_{2n} x_n^{(k-1)}) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n^{(k)} &= \frac{1}{a_{nn}} (y_n - a_{n1} x_1^{(k-1)} - a_{n2} x_2^{(k-1)} - \dots - a_{n, n-1} x_{n-1}^{(k-1)}) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นเงื่อนไขที่ดี และโดยทั่วไปแล้วการแก้ปัญหานี้จะลู่เข้า (converge) ซึ่งจะแน่ใจได้ว่าลู่เข้าถ้าสัมประสิทธิ์บนเส้นทแยงมุม a_{ij} มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์นอกเส้นทแยงมุม a_{ij} เมื่อ $i \neq j$



ตัวอย่างที่ 3.1 จากวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ให้เขียนสมการแรงดันและแก้ปัญหของวงจรเพื่อหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3 โดยวิธีการของเกาส์โอเทอเรน



รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้า

วิธีทำ ใช้วิธีการตรวจพินิจเพื่อเขียนสมการแรงดันได้ดังนี้

ลูปที่ 1 :

$$8I_1 - 3I_2 - 4I_3 = 100$$

ลูปที่ 2 :

$$-3I_1 + 10I_2 - 5I_3 = -50$$

ลูปที่ 3 :

$$-4I_1 - 5I_2 + 15I_3 = 0$$

เขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างคือ

$$I_1 = \frac{1}{8} (100 + 3I_2 + 4I_3)$$

$$I_2 = \frac{1}{10} (-50 + 3I_1 + 5I_3)$$

$$I_3 = \frac{1}{15} (0 + 4I_1 + 5I_2)$$



สมมติค่าเริ่มต้นของกระแสคือ

$$I_1^{(0)} = \frac{100}{8} = 12.5$$

$$I_2^{(0)} = \frac{-50}{10} = -5$$

$$I_3^{(0)} = \frac{0}{15} = 0$$

แทนค่ากระแสในไอเทอเรนซ์เริ่มต้นเพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 1

$$I_1^{(1)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(-5) + 4(0)] = 10.625$$

$$I_2^{(1)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(12.5) + 5(0)] = -1.25$$

$$I_3^{(1)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(12.5) + 5(-5)] = 1.667$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 2

$$I_1^{(2)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(-1.25) + (4)(1.667)] = 12.865$$

$$I_2^{(2)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(10.625) + (5)(1.667)] = -0.979$$

$$I_3^{(2)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(10.625) + (5)(-1.25)] = 2.417$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 3

$$I_1^{(3)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(-0.979) + (4)(2.417)] = 13.341$$

$$I_2^{(3)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(12.865) + (5)(2.417)] = 0.068$$

$$I_3^{(3)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(12.865) + (5)(-0.979)] = 3.104$$

เมื่อดำเนินการไอเทอเรนซ์ต่อไป จนกระทั่งถึงไอเทอเรนซ์ที่ 19 จะมีค่ากระแสดังนี้

$$I_1^{(19)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(2.192) + (4)(4.931)] = 15.788$$

$$I_2^{(19)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(15.779) + (5)(4.931)] = 2.199$$

$$I_3^{(19)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(15.779) + (5)(2.192)] = 4.938$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 19 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 20

$$I_1^{(20)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(2.199) + (4)(4.938)] = 15.794$$

$$I_2^{(20)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(15.788) + (5)(4.938)] = 2.205$$

$$I_3^{(20)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(15.788) + (5)(2.199)] = 4.943$$

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างไอเทอเรนซ์ที่ 20 และไอเทอเรนซ์ที่ 19 คือ

$$\Delta I_1 = 15.794 - 15.788 = 0.006$$

$$\Delta I_2 = 2.205 - 2.199 = 0.006$$

$$\Delta I_3 = 4.943 - 4.938 = 0.005$$

ถ้ากำหนดให้การลู่เข้าหาค่าตอบจะถือว่าสิ้นสุดเมื่อ ΔI มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีที่กำหนด เช่น $\Delta I < 0.01$ ดังนั้นการแก้ปัญหาเพื่อหาค่ากระแส I_1 , I_2 และ I_3 จะมีการลู่เข้าหาค่าตอบประมาณ ไอเทอเรนซ์ที่ 20 โดยมีค่ากระแสดังนี้

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= 15.794 \text{ A} \\ I_2 &= 2.205 \text{ A} \\ I_3 &= 4.943 \text{ A} \end{aligned} \right\} \text{ตอบ}$$

3.2 วิธีไอเทอเรติฟของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Iterative Method)

วิธีนี้จะเป็นการปรับปรุงวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์ เนื่องจากการแก้ปัญหาโดยวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์จะต้องใช้จำนวนไอเทอเรนซ์มาก ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์-ไซเดล จะช่วยให้ลดจำนวนไอเทอเรนซ์ลง ความแตกต่างระหว่างไอเทอเรนซ์ของเกาส์และเกาส์-ไซเดลคือ ในไอเทอเรนซ์ที่ k เดียวกันจะมีการแทนค่าประมาณของตัวแปรอิสระที่ทราบค่าแล้วลงในสมการของตัวแปรอิสระที่ยังไม่ทราบค่าทุกสมการ ดังสมการต่อไปนี้



$$x_1^{(k)} = \frac{1}{a_{11}} (y_1 - a_{12} x_2^{(k-1)} - a_{13} x_3^{(k-1)} - \dots - a_{1n} x_n^{(k-1)})$$

แต่สมการต่อไปของไอเทอเรนซ์ที่ k จะมีค่าเป็น

$$\left. \begin{aligned} x_2^{(k)} &= \frac{1}{a_{22}} (y_2 - a_{21} \underbrace{x_1^{(k)}} - a_{23} x_3^{(k-1)} - \dots - a_{2n} x_n^{(k-1)}) \\ x_3^{(k)} &= \frac{1}{a_{33}} (y_3 - a_{31} \underbrace{x_1^{(k)}} - a_{32} \underbrace{x_2^{(k)}} - \dots - a_{3n} x_n^{(k-1)}) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n^{(k)} &= \frac{1}{a_{nn}} (y_n - a_{n1} \underbrace{x_1^{(k)}} - a_{n2} \underbrace{x_2^{(k)}} - \dots - a_{n, n-1} \underbrace{x_{n-1}^{(k)}}) \end{aligned} \right\} (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) ค่าในวงกลมจะแทนค่าของ $x^{(k)}$ ที่หาได้จากขั้นตอนก่อนหน้าของไอเทอเรนซ์ที่ k

ตัวอย่างที่ 3.2 จากวงจรไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 3.1 ให้แก้ปัญหาวงจรโดยใช้วิธีของเกาส์-ไซเดล

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 3.1 ค่าเริ่มต้นของกระแสต่างๆ คือ

$$\begin{aligned} I_1^{(0)} &= 12.5 \\ I_2^{(0)} &= -5 \\ I_3^{(0)} &= 0 \end{aligned}$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์เริ่มต้น เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 1

$$\begin{aligned} I_1^{(1)} &= \frac{1}{8} [100 + (3)(-5) + 4(0)] = 10.625 \\ I_2^{(1)} &= \frac{1}{10} [-50 + (3)(10.625) + 5(0)] = -1.813 \\ I_3^{(1)} &= \frac{1}{15} [0 + (4)(10.625) + (5)(-1.813)] = 2.229 \end{aligned}$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 1 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 2

$$\begin{aligned} I_1^{(2)} &= \frac{1}{8} [100 + (3)(-1.813) + 4(2.229)] = 12.935 \\ I_2^{(2)} &= \frac{1}{10} [-50 + (3)(12.935) + 5(2.229)] = -0.005 \\ I_3^{(2)} &= \frac{1}{15} [0 + (4)(12.935) + (5)(-0.005)] = 3.448 \end{aligned}$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 2 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 3

$$I_1^{(3)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(-0.005) + (4)(3.448)] = 14.222$$

$$I_2^{(3)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(14.222) + (5)(3.448)] = 0.991$$

$$I_3^{(3)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(14.222) + (5)(0.991)] = 4.123$$

เมื่อดำเนินการไอเทอเรนซ์ต่อไป จนกระทั่งถึงไอเทอเรนซ์ที่ 11 จะมีค่ากระแสดังนี้

$$I_1^{(11)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(2.203) + (4)(4.944)] = 15.798$$

$$I_2^{(11)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(15.798) + (5)(4.944)] = 2.211$$

$$I_3^{(11)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(15.798) + (5)(2.211)] = 4.950$$

แทนค่ากระแสของไอเทอเรนซ์ที่ 11 เพื่อหาค่ากระแสในไอเทอเรนซ์ที่ 12

$$I_1^{(12)} = \frac{1}{8} [100 + (3)(2.211) + (4)(4.950)] = 15.804$$

$$I_2^{(12)} = \frac{1}{10} [-50 + (3)(15.804) + (5)(4.950)] = 2.216$$

$$I_3^{(12)} = \frac{1}{15} [0 + (4)(15.804) + (5)(2.216)] = 4.953$$

สำหรับผลต่างของกระแส (ΔI) ระหว่างไอเทอเรนซ์ที่ 12 และไอเทอเรนซ์ที่ 11 คือ

$$\Delta I_1 = 15.804 - 15.798 = 0.006$$

$$\Delta I_2 = 2.216 - 2.211 = 0.005$$

$$\Delta I_3 = 4.953 - 4.950 = 0.003$$

ถ้าค่าดัชนีที่กำหนดเท่ากับ 0.01 ดังนั้น $\Delta I < 0.01$ การแก้ปัญหาเพื่อหาค่า I_1 , I_2 และ I_3 จะลู่เข้าหาคำตอบประมาณไอเทอเรนซ์ที่ 12 โดยมีค่ากระแสดังนี้

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= 15.804 \text{ A} \\ I_2 &= 2.216 \text{ A} \\ I_3 &= 4.953 \text{ A} \end{aligned} \right\} \text{ตอบ}$$

เมื่อเปรียบเทียบวิธีแก้ปัญหาคำตอบด้วยวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์กับวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์-ไซเดล ตามตัวอย่างที่ 3.1 และตัวอย่างที่ 3.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาคำตอบของสมการเชิงเส้นด้วยวิธีไอเทอเรนซ์ของเกาส์-ไซเดลจะมีการลู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่า

3.3 วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method)

เทคนิคของวิธีนิวตัน-ราฟสันจะใช้แก้ปัญหาคำตอบไม่เชิงเส้น สามารถหาคำตอบได้ด้วยการประมาณค่าและการทำไอเทอเรนซ์ จากฟังก์ชัน x ใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมของอนุกรมกำลัง (power series) ได้ โดยเฉพาะการเขียนด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) ได้ดังนี้

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (3.7)$$

อนุกรมเทย์เลอร์นี้จะลู่เข้าได้รวดเร็วสำหรับค่าของ x ที่ใกล้กับ a ในการประมาณค่าคำตอบ โดยสมมติให้ลู่เข้าด้วยการใช้เพียงสองเทอมแรกของสมการที่ (3.7) ถ้าเราแทน a ด้วย x และแทน x ด้วย $(x+\Delta x)$ อนุกรมนี้จะมีค่าเป็น

$$y = f(x+\Delta x) = f(x) + f'(x) \Delta x + \dots \quad (3.8)$$

↑ สมมติให้เป็น 0

สมการที่ (3.8) จะใช้ได้สำหรับสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปร (x) เพียงตัวเดียว ในขณะที่หากำลังสนใจกับสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปรหลายตัว ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) ซึ่งเราจะแก้ปัญหาคำตอบโดยการประยุกต์ใช้หลักการของสมการที่ไม่ทราบค่าตัวแปรเพียงตัวเดียว ดังนี้

กำหนดให้

$$x^{(0)} = \text{ค่าประมาณที่ 1}$$

$$x^{(1)} = \text{ค่าประมาณที่ 2}$$

เมื่อ $x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x$ แทนลงในสมการที่ (3.8) จะได้

$$f(x^{(1)}) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x^{(1)} - x^{(0)}) \quad (3.9)$$

ถ้า $x^{(1)}$ เป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงคำตอบมากกว่า $x^{(0)}$ เราสามารถที่จะสมมติให้เส้นโค้ง $y=f(x)$ ของสมการตัดกับแกน x เมื่อ $y^{(1)} = f(x^{(1)}) = 0$ ดังนั้น

$$0 = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x^{(1)} - x^{(0)}) \quad (3.10)$$

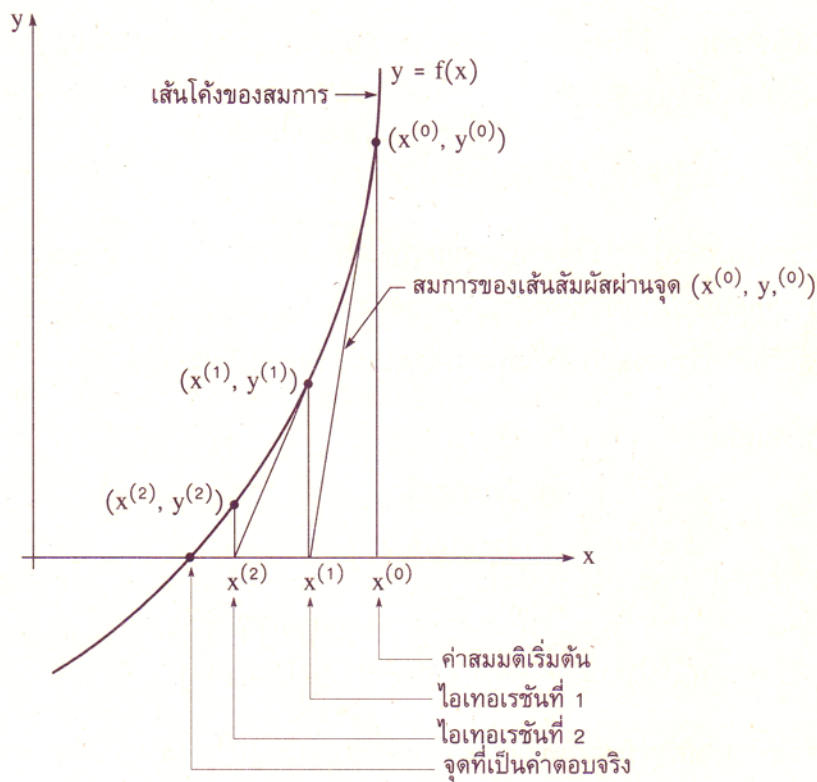
จากสมการที่ (3.10) สามารถหาค่าประมาณที่ 2 ในเทอมของค่าประมาณที่ 1 ได้ดังนี้

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปสำหรับการประมาณค่าที่ (k+1) เพื่อหาคำตอบของสมการเดียวและตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียวได้ดังนี้

$$x^{(k+1)} = x^k - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \quad (3.12)$$

สมการที่ (3.11) อาจหาได้อีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ วิธีนี้ทำได้โดยการสมมติให้มีเส้นสัมผัส (tangent line) กับเส้นโค้งของสมการที่จุดประมาณที่ 1 ($x^{(0)}, y^{(0)}$) ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แนวความคิดสำหรับการหาสูตรประมาณค่าคำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1^{(0)} \\ y_2 - f_2^{(0)} \\ \dots \\ y_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์อนุพันธ์บางส่วนในบางครั้งจะเรียกว่า *จาโคเบียนเมทริกซ์ (jacobian matrix)* และในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าในอาร์เรย์ของ Δx จะต้องใช้เทคนิคการลดรูปแบบต่างๆ (matrix reduction) หรือกระบวนการอินเวอร์ส (matrix inversion) จาโคเบียนเมทริกซ์

ตัวอย่างที่ 3.3 จงแก้ปัญหของสมการไม่เชิงเส้นต่อไปนี้ด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2) &= x_1^2 - 4x_2 - 4 = 0 \\ f_2(x_1, x_2) &= 2x_1 - x_2 - 2 = 0 \end{aligned}$$

วิธีทำ

- กำหนดค่าเริ่มต้นของ $x_1^{(0)} = 1$ และ $x_2^{(0)} = -1$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) &= 1 + 4 - 4 = 1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) &= -2 + 1 - 2 = 1 \end{aligned}$$

- อนุพันธ์บางส่วนคือ

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_1 &= 2x_1 = 2 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_1 &= 2 \\ \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{-1} &= -4 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{-1} &= -1 \end{aligned}$$

- จากสมการที่ (3.16) หาค่า $\Delta x_1^{(0)}$ และ $\Delta x_2^{(0)}$ ได้คือ

$$y_1 - f_1^{(0)} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_1 \Delta x_1^{(0)} + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{-1} \Delta x_2^{(0)} \quad (1)$$

$$y_2 - f_2^{(0)} = \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_1 \Delta x_1^{(0)} + \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{-1} \Delta x_2^{(0)} \quad (2)$$

4. เมื่อแทนค่าตัวเลขลงใน (1) และ (2) จะได้

$$0 - 1 = 2\Delta x_1^{(0)} - 4\Delta x_2^{(0)} \quad (3)$$

$$0 - 1 = 2\Delta x_1^{(0)} - 1\Delta x_2^{(0)} \quad (4)$$

5. นำ (4) ลบออกจาก (3) จะได้

$$-3\Delta x_2^{(0)} = 0$$

และ $\Delta x_2^{(0)} = 0$

ดังนั้น

$$\Delta x_1^{(0)} = -0.5$$

6. การประมาณค่า x สำหรับการทำไอเทอเรนซ์ต่อไปคือ

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} = 1 + (-0.5) = 0.5$$

$$x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} = -1 + 0 = -1.0$$

ต่อไปก็จะทำกระบวนการไอเทอเรนซ์ซ้ำเดิมในขั้นตอนที่ 1 ใหม่ โดยใช้ค่า $x_1^{(1)} = 0.5$ และ $x_2^{(1)} = -1.0$ และจะได้คำตอบในไอเทอเรนซ์ที่ 2 และไอเทอเรนซ์ที่ 3 ดังนี้

$$x_1^{(2)} = 0.5357 \text{ และ } x_2^{(2)} = -0.9286$$

$$x_1^{(3)} = 0.5359 \text{ และ } x_2^{(3)} = -0.9282$$

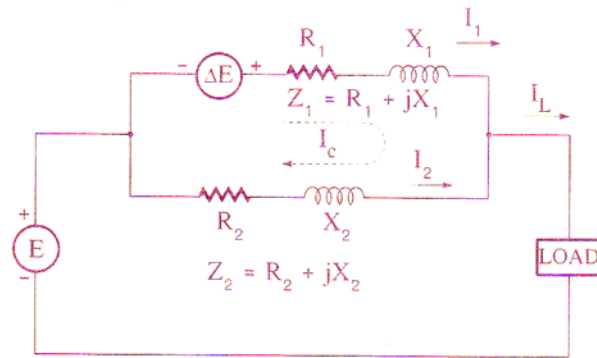
ตอบ

3.4 แนวความคิดในการควบคุมแรงดัน วัตต์ และวาร์ (Concept in The Control of Voltage Watts and Vars)

ก่อนที่จะมองเข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อคำนวณการไหลของโหลด จะต้องทำความเข้าใจถึงตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการไหลของกำลังจริง (วัตต์) และกำลังรีแอกทีฟ (วาร์) ก่อน เนื้อหาในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นถึงความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันที่บัสต่อการไหลของวาร์ และความสัมพันธ์ของมุมเฟสของแรงดันที่บัสต่อการไหลของวัตต์

3.4.1 การไหลวนของวาร์ระหว่างหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนของจำนวนรอบไม่เท่ากัน

หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบไม่เท่ากัน เมื่อนำมาต่อขนานกันจะทำให้มีกระแสจากหม้อแปลงที่มีการเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุกขดขมุกสูงกว่าไหลไปยังหม้อแปลงลูกอื่นๆ ที่นำมาต่อขนานกัน ดังรูปที่ 3.3 แสดงการต่อขนานกันของหม้อแปลง 2 ลูก



รูปที่ 3.3 การต่อขนานหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดร่วมกัน

จากรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาตามกฎการแบ่งกระแส (current divider) จะแบ่งกระแสโหลด I_L เป็น 2 ส่วนดังนี้

$$I_1 = I_L \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{และ} \quad I_2 = I_L \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.19)$$

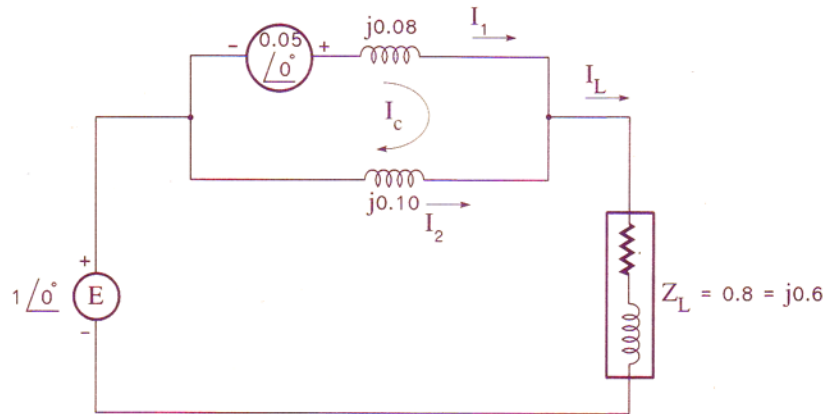
อย่างไรก็ตามในการยก (boost) ตัวเปลี่ยนจุดแยก (tap changer) ของหม้อแปลงลูกที่ 1 จะเกิดผลให้มีแรงดัน ΔE ซ้อนเข้าไปในวงจร พิจารณากระแส I_1 และ I_2 ที่เป็นส่วนประกอบของกระแสโหลดจากการจ่ายของแรงดัน E เมื่อมีแรงดัน ΔE เพิ่มเข้ามาจะทำให้เกิดกระแส I_c ไหลวนระหว่างหม้อแปลงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทั้งสอง

$$I_c = \frac{\Delta E}{Z_1 + Z_2} \quad (3.20)$$

ถ้า Z_1 และ Z_2 ประกอบด้วยความต้านทานและรีแอกแตนซ์ต่ออนุกรมกัน และความต้านทานจะมีค่าน้อยกว่ารีแอกแตนซ์มาก ดังนั้นจึงถือว่า Z_1 และ Z_2 เป็นอินดักทีฟ ด้วยเหตุนี้ กระแส I_c จึงมีมุมเฟสล้าหลัง ΔE (และ E) เกือบ 90° และด้วยเหตุผลนี้จึงกล่าวได้ว่ามีวาร์ไหลวนอยู่ในในลูปของหม้อแปลงทั้งสอง



ตัวอย่างที่ 3.4 หม้อแปลง 2 ลูกต่อขนานกันโดยจ่ายกระแสให้กับโหลด $0.8 + j0.6$ pu หม้อแปลง ลูกที่ 1 ได้มีการยกตัวเปลี่ยนจุดแยกให้สูงขึ้นจากแรงดันที่ระบุ 5% ในขณะที่หม้อแปลงลูกที่ 2 ตั้ง จุดแยกอยู่ในระดับแรงดันที่ระบุ หม้อแปลงลูกที่ 1 และลูกที่ 2 มีรีแอคแตนซ์ $j0.08$ และ $j0.10$ pu ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองมีปริมาณเบสเดียวกัน จงหาค่ากระแสของหม้อแปลงทั้งสองโดยประมาณ ถ้าพิจารณาให้แรงดันขาเข้ามีค่าเป็น 100 % (1.0 pu)



รูปที่ 3.4 การต่อขนานหม้อแปลง

วิธีทำ พิจารณาให้แหล่งจ่ายแรงดันมีค่าเป็น 1.0 pu

หาค่ากระแสโหลดและส่วนประกอบมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_L &= \frac{1.0}{Z_L + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}} \\
 &= \frac{1.0}{0.8 + j0.6 + \frac{(j0.08)(j0.10)}{j0.08 + j0.10}} \\
 &= \frac{1.0}{0.8 + j0.645} = 0.970 \angle -38.9^\circ \text{ pu} \\
 I_1 &= I_L \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \\
 &= (0.97 \angle -38.9^\circ) \left(\frac{j0.10}{j0.08 + j0.10} \right) \\
 &= 0.538 \angle -38.9^\circ \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= I_1 \frac{Z_1}{Z_2} \\
&= 0.538 \angle -38.9^\circ \left(\frac{j0.08}{j0.10} \right) \\
&= 0.432 \angle -38.9^\circ \text{ pu}
\end{aligned}$$

หาค่ากระแสไหลวนระหว่างหม้อแปลงทั้งสอง

$$\begin{aligned}
I_c &= \frac{\Delta E}{Z_1 + Z_2} \\
&= \frac{0.05}{j0.08 + j0.10} \\
&= -j0.278 \text{ pu}
\end{aligned}$$

หาค่ากระแสที่ผ่านหม้อแปลงลูกที่ 1 และลูกที่ 2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
I_{\text{tot1}} &= I_1 + I_c \\
&= 0.538 \angle -38.9^\circ - j0.278 \\
&= 0.419 - j0.337 - j0.278 \\
&= 0.419 - j0.615 = 0.744 \angle -55.7^\circ \text{ pu} \quad \text{ตอบ}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{\text{tot2}} &= I_2 - I_c \\
&= 0.432 \angle -38.9^\circ - (-j0.278) \\
&= 0.337 - j0.271 + j0.278 \\
&= 0.337 + j0.007 = 0.337 \angle 1.1^\circ \text{ pu} \quad \text{ตอบ}
\end{aligned}$$

จากตัวอย่างที่ 3.4 จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแส I_1 , I_2 และ I_L จะมีเฟสเหมือนกัน และกระแสไหลวน I_c จะรวมกับกระแส I_1 แต่จะหักล้างกับกระแส I_2

3.4.2 การไหลวนของวาร์ระหว่างบัสที่มีขนาดแรงดันไม่เท่ากัน

โดยทั่วไปการพิจารณาการไหลวนของวาร์จะมีลักษณะเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.4.1 จากไดอะแกรมตามรูปที่ 3.5 (ก) มีโหลด 3 เฟสสมดุลทั้งหลายรับไฟฟ้าจากสายส่งที่มีแหล่งจ่ายมาจากบัส 1 และบัส 2 (E_1 และ E_2) เมื่อ $|E_1| > |E_2|$ และมีมุมเฟสเท่ากัน $\angle \theta_1 = \angle \theta_2$ ดังนั้น

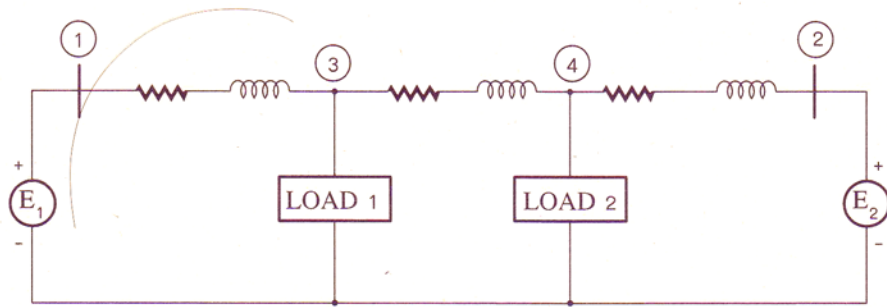
$$E_1 = E_2 + \Delta E$$

จากรูปที่ 3.5 (ก) อาจแทนได้ด้วยรูปที่ 3.5 (ข) เมื่อใส่แรงดัน ΔE ซ้อนเข้าไปในวงจร และสามารถแก้ปัญหานี้เป็น 2 ส่วนตามรูปที่ 3.5 (ค) และรูปที่ 3.5 (ง) ในการหาค่าของกระแสไหลวน I_c ก็พิจารณาให้อิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมาก ดังนั้นแรงดัน ΔE ทำให้เกิดการไหลของกระแสไหลวน I_c รอบวงจรจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 ซึ่งค่าของกระแส I_c สามารถประมาณได้ดังนี้

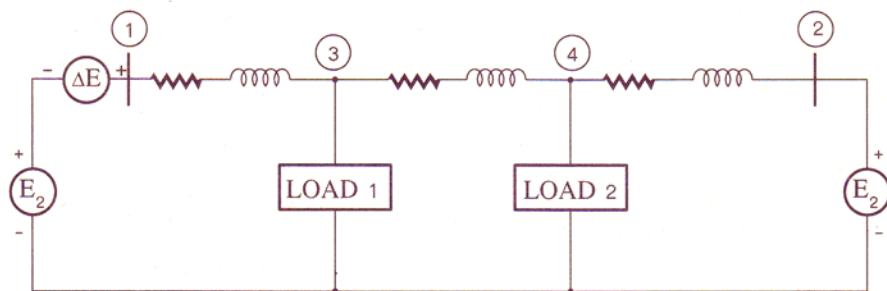
$$I_c = \frac{\Delta E}{Z_{line}} \quad (3.21)$$

ถ้าสายส่งมีค่า $X \gg R$ ดังนั้นกระแสไหลวนจะมีเฟสล้าหลังแรงดันตามเฟสเซอร์ไวดอะแกรมในรูปที่ 3.6 และวาร์ที่มีค่าเป็นเปอร์ยูนิตคือ

$$\text{Vars}_{\text{circ}} = \frac{\text{pu } \Delta E}{\text{pu } Z_{line}} \text{ pu} \quad (3.22)$$

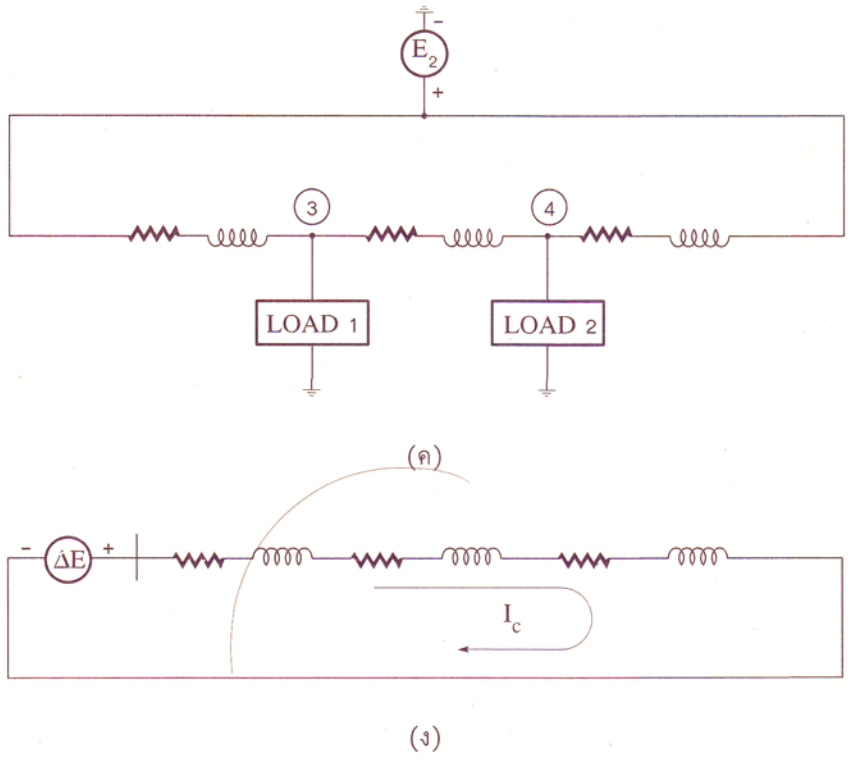


(ก)

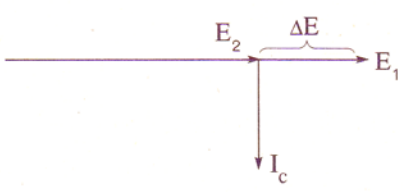


(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) ไดอะแกรมต่อเฟสของโหลด 3 เฟสสมดุล
(ข) ไดอะแกรมต่อเฟสที่มีแรงดัน ΔE ซ้อนเข้าไปในวงจร



รูปที่ 3.5 (ต่อ) (ค) วงจรสำหรับการประมาณส่วนประกอบของกระแสโหลด
 (ง) วงจรสำหรับการประมาณกระแสไหลวน



รูปที่ 3.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับรูปที่ 3.5 (ง) เมื่อ $X_{line} \gg R_{line}$ และขนาดของแรงดันไม่เท่ากัน

3.4.3 การไหลวนของวัตต์ระหว่างบัสที่มีมุมเฟสของแรงดันต่างกัน

จากรูปที่ 3.5 (ง) ถ้าสมมติให้ขนาดของแรงดันที่บัสทั้งสองเท่ากัน ($E_1 = E_2$) แต่ E_1 มีมุมนำหน้า E_2 ตามเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 3.7

เมื่อ E_1 และ E_2 มีมุมเฟสแตกต่างกันตามรูปที่ 3.7 แรงดัน ΔE จะทำให้เกิดกระแสไหลวนจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 และกระแสไหลวน I_c จะล้าหลัง ΔE เป็นมุม 90° ($X \gg R$) แต่เกือบจะมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน E_1 และ E_2 ด้วยเหตุผลนี้จึงกล่าวได้ว่า มีการไหลวนของวัตต์จากบัสที่มีมุมเฟสมากกว่าไปยังบัสที่มีมุมเฟสน้อยกว่า ซึ่งข้อเท็จจริงนี้ต้องให้ความสนใจเมื่อจะมีการต่อเชื่อมระบบหรือก่อนที่จะเชื่อมสายส่งระหว่างสองบัสใดๆ ในระบบเข้าด้วยกัน

พิจารณาจากรูปที่ 3.7

$$|\Delta E| = |E| \sin \delta \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.21)

$$|I_c| = \frac{\Delta E}{X_{line}}$$

ดังนั้น

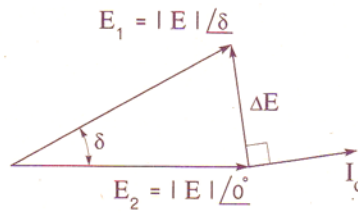
$$|I_c| = \frac{|E| \sin \delta}{X_{line}} \quad (3.24)$$

ดังนั้นการไหลของวัตต์ระหว่างบัสในแต่ละเฟสคือ

$$\begin{aligned} \text{Watt}_{\text{circ}} &= |E| \times |I_c| \\ &= |E| \times \frac{|E| \sin \delta}{X_{line}} \\ \text{Watt}_{\text{circ}} &= \frac{|E|^2 \sin \delta}{X_{line}} \end{aligned} \quad (3.25)$$

จะเห็นว่าวัตต์ไหลวนตามสมการที่ (3.25) จะคล้ายกับสมการถ่ายโอนกำลังตามสมการที่ (1.27)





รูปที่ 3.7 แรงดัน E_1 และ E_2 ที่มีมุมเฟสไม่เท่ากัน

เมื่อ E_1 และ E_2 มีมุมเฟสแตกต่างกันตามรูปที่ 3.7 แรงดัน ΔE จะทำให้เกิดกระแสไหลวนจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 และกระแสไหลวน I_c จะล้าหลัง ΔE เป็นมุม 90° ($X \gg R$) แต่เกือบจะมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน E_1 และ E_2 ด้วยเหตุผลนี้จึงกล่าวได้ว่า มีการไหลวนของวัตต์จากบัสที่มีมุมเฟสมากกว่าไปยังบัสที่มีมุมเฟสน้อยกว่า ซึ่งข้อเท็จจริงนี้ต้องให้ความสนใจเมื่อจะมีการต่อเชื่อมระบบหรือก่อนที่จะเชื่อมสายส่งระหว่างสองบัสใดๆ ในระบบเข้าด้วยกัน

พิจารณาจากรูปที่ 3.7

$$|\Delta E| = |E| \sin \delta \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.21)

$$|I_c| = \frac{\Delta E}{X_{line}}$$

ดังนั้น

$$|I_c| = \frac{|E| \sin \delta}{X_{line}} \quad (3.24)$$

ดังนั้นการไหลของวัตต์ระหว่างบัสในแต่ละเฟสคือ

$$\begin{aligned} \text{Watt}_{circ} &= |E| \times |I_c| \\ &= |E| \times \frac{|E| \sin \delta}{X_{line}} \\ \text{Watt}_{circ} &= \frac{|E|^2 \sin \delta}{X_{line}} \end{aligned} \quad (3.25)$$

จะเห็นว่าวัตต์ไหลวนตามสมการที่ (3.25) จะคล้ายกับสมการถ่ายโอนกำลังตามสมการที่ (1.27)

สำหรับข้อเท็จจริงที่ปรากฏในหัวข้อที่ 3.4.1 ถึง 3.4.3 จะพบว่าการไหลของวาร์สามารถคุมค่าได้โดยขนาดแรงดันระหว่างบัสทั้งสองที่จะมีวาร์ไหล ส่วนการไหลของวัตต์จะใช้การควบคุมมุมเฟสของแรงดันระหว่างบัส ซึ่งในทางปฏิบัติมีการดำเนินการดังนี้

1. การคุมค่าการไหลของวาร์

- ปรับสนามกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (synchronous condensers)
- สวิตซ์ชดเชยชัณฑ์คาปาซิเตอร์
- เปลี่ยนจุดแยกของหม้อแปลงเพื่อเพิ่มหรือลดขนาดแรงดัน

2. การไหลของวัตต์ในระบบเริ่มแรกจะต้องหามุมเฟสของแรงดันที่บัสก่อน และมุมเฟสนี้จะควบคุมค่าโดยความสัมพันธ์ของกำลังขาเข้าที่เพลลาของเครื่องต้นกำลัง (prime movers) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือใช้วิธีการเลื่อนเฟส (phase shift) ของหม้อแปลง

3.5 นิยามปัญหาการไหลของโหลด (Definition of The Load Flow Problem)

การศึกษาการไหลของโหลดในบทนี้จะศึกษาระบบ 3 เฟสสมดุล และการคำนวณเป็นระบบเฟสเดียว ผลของการศึกษาที่สมบูรณ์มีความต้องการที่ทราบถึงตัวแปร 4 ตัว ที่แต่ละบัส k ใดๆ ในระบบคือ

1. กำลังจริงที่บัส (P_k)
2. กำลังรีแอกทีฟที่บัส (Q_k)
3. ขนาดแรงดันที่บัส (V_k)
4. มุมเฟสของแรงดันที่บัส (δ_k)

ก่อนการแก้ปัญหาจะต้องทราบค่าตัวแปรที่แต่ละบัส 2 ค่าก่อนและหลังจากได้แก้ปัญหาการไหลของโหลดจะมีผลทำให้ทราบค่าตัวแปร 2 ค่าที่เหลือ

โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังจะกำหนดโหนดหรือบัสไว้ 3 ชนิดดังนี้

1. บัสสวิง (swing bus or slack bus)

บัสนี้เป็นบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ในการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดและกำลังสูญเสียของระบบ บัสสวิงจะกำหนดค่าขนาดแรงดัน (V) และมุมเฟส (δ_v) เพื่อความสะดวกจะเลือกค่า $V/\delta_v = 1.0/0^\circ$ pu ซึ่งถือว่าเป็นเฟสอ้างอิงของระบบ

2. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator bus or voltage controlled bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริงขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P) และขนาดแรงดันที่ผลิตได้ของบัส ($|V|$) ส่วนค่า Q และ δ_v จะต้องคำนวณหา

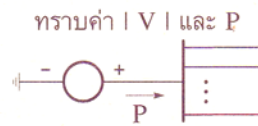
3. บัสโหลด (load bus)

บัสนี้จะทราบค่ากำลังจริง (P_L) และกำลังรีแอกทีฟ (Q_L) ซึ่งเป็นกำลังตามความต้องการของโหลด โดยต้องคำนวณหาขนาดแรงดัน $|V|$ และมุมเฟส δ ของบัส สำหรับบัสที่ไม่มีทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัสนี้จะพิจารณาเป็นบัสโหลดเช่นเดียวกัน

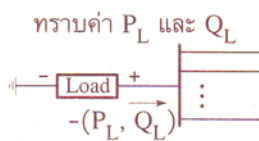
จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในบัสแต่ละชนิดจะมีตัวแปรที่ทราบค่าเพียง 2 ตัว ส่วนตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัวจะต้องคำนวณหา โดยรูปที่ 3.8 ได้แสดงตัวแปรที่กำหนดในบัสแต่ละชนิด



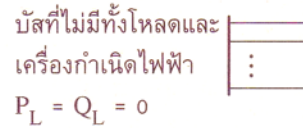
(ก) บัสสวิง



(ข) บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



(ค) บัสโหลด



(ง) บัสโหลดที่ $P_L = Q_L = 0$

รูปที่ 3.8 บัสชนิดต่างๆ โดยกำลังที่ไหลเข้าบัสถือว่าเป็นบวก

ในการตั้งปัญหาการไหลของโหลดนั้นจะต้องมีสมการของระบบซึ่งจะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับวิธีการแก้ปัญหา โดยมีความเป็นไปได้ที่สามารถแนะนำได้ 3 วิธีดังนี้

1. สมการกระแสสามารถเขียนสมการที่บัส k ใดๆ ในเทอมของแรงดันที่ไม่ทราบค่า รูปแบบของสมการนี้คือ

$$I_k = Y_{k1} V_1 + Y_{k2} V_2 + \dots + Y_{kn} V_n \quad (3.26)$$

วิธีนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายและจะได้สมการที่เป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้น แหล่งจ่ายกระแสที่ทราบค่า I_k สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ P_k, Q_k และ V_k ได้ ถ้ามีความจำเป็นสมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์โดยการใช้บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ ซึ่งจะมีรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.6

2. สมการแรงดันสามารถเขียนสมการที่รูป k ใดๆ ในเทอมของกระแสที่ไม่ทราบค่า รูปแบบทั่วไปของสมการนี้คือ

$$E_k = Z_{k1} I_1 + Z_{k2} I_2 + \dots + Z_{kn} I_n \quad (3.27)$$

สมการที่ได้จะเป็นกลุ่มของสมการเชิงเส้นเช่นเดียวกัน สมการเชิงเส้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ค่อยจะเหมาะสมกับการแก้ปัญหาการไหลของโหลด

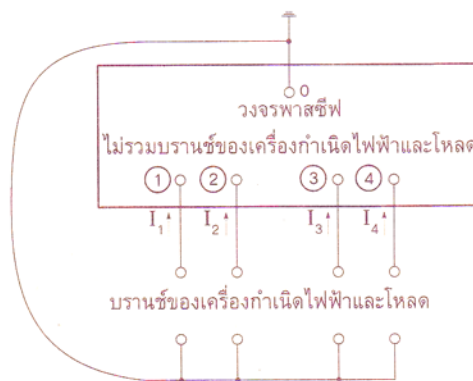
3. การเขียนสมการของบัสในเทอมของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ในกรณีนี้สมการของกำลังที่ไหลเข้าหรือออกจากบัส k ใดๆ จะอยู่ในรูปแบบของสมการไม่เชิงเส้นคือ

$$\begin{aligned} P_k + jQ_k = & |Y_{k1}| E_1 |E_k| \frac{\delta_k - \delta_1 - \theta_{k1}}{\dots} \\ & + |Y_{k2}| E_2 |E_k| \frac{\delta_k - \delta_2 - \theta_{k2}}{\dots} + \dots \\ & + |Y_{kn}| E_n |E_k| \frac{\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}}{\dots} \end{aligned} \quad (3.28)$$

จากตัวแปร 4 ตัวที่บัส k ใดๆ (P_k , Q_k , $|E_k|$, และ δ_k) จะมีตัวแปรที่ทราบค่า 2 ตัว และไม่ทราบค่า 2 ตัว การแก้ปัญหาจะใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่ได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสำหรับแก้ปัญหากลุ่มของสมการที่ (3.28)

3.6 แนวความคิดของบัสแอดมิตแดนซ์สำหรับการศึกษาการไหลของโหลดด้วยไอเทอเรนชันของเกาส์-ไซเดล

ก่อนที่จะศึกษารายละเอียดในหัวข้อนี้ขอแนะนำให้ทบทวนและทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการของโหนด-แอดมิตแดนซ์ในหัวข้อที่ 2.3 ก่อนก็จะเป็นการดี



รูปที่ 3.9

$$\left. \begin{aligned}
 V_2 &= \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3 - \dots - Y_{2n}V_n \right] \\
 \text{ในทำนองเดียวกัน} \\
 V_3 &= \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^*} - Y_{31}V_1 - Y_{32}V_2 - Y_{34}V_4 - \dots - Y_{3n}V_n \right] \\
 \dots
 \end{aligned} \right\} (3.33)$$

สำหรับที่บัส k ใดๆ จะมีรูปแบบของสมการทั่วไปคือ

$$\boxed{V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki}V_i \right]} \quad (3.34)$$

สำหรับสมการของบัสที่ 1 ที่เกี่ยวข้องกับบัสสวิงจะละเว้นไม่ต้องนำมาแก้ปัญหาเพราะแรงดัน V_1 ให้ถือว่าเป็นแรงดันอ้างอิงของระบบ โดยที่บัสสวิงจะกำหนดค่าแรงดันไว้แล้วทั้งขนาดและมุมเฟส

ในการแก้ปัญหาเพื่อศึกษาการไหลของโหลด จะมีขั้นตอนของการไอเทอเรชันดังต่อไปนี้

1. สร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ (สร้าง Y_{bus})
2. สมมติค่าเริ่มต้นของเฟสเซอร์แรงดัน (ทั้งขนาดและมุมเฟส) สำหรับบัสโหลด และค่าเริ่มต้นของมุมเฟสสำหรับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ยกเว้นบัสสวิง) โดยสมมติค่าเหล่านี้เป็น $V_2^{(0)}, V_3^{(0)}, \dots, V_n^{(0)}$ (V_1 ให้เป็นแรงดันของบัสสวิง)

3. คำนวณหาค่า $V_2^{(1)}$ ในเทอมของแรงดันที่ได้สมมติค่าเริ่มต้นคือ

$$V_2^{(1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_{21}V_1^{(0)} - Y_{23}V_3^{(0)} - \dots - Y_{2n}V_n^{(0)} \right] \quad (3.35)$$

4. แทนค่า $V_2^{(1)}$ ที่คำนวณได้กลับลงในเทอมขวามือของสมการที่ (3.35) เพื่อหาค่า V_2 ของไอเทอเรชันใหม่ ดำเนินการตามกระบวนการนี้ต่อไปจนครบตามจำนวนไอเทอเรชันที่กำหนด ค่าของ V_2 ในไอเทอเรชันสุดท้ายจะมีความถูกต้องมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับสมมติค่าแรงดันของบัสอื่นๆ ด้วย

5. ดำเนินการไอเทอเรชันบัสที่ 3 ต่อไป โดยการนำ V_2 ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 4 มาแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าแรงดัน V_3 เมื่อทำการไอเทอเรชันแล้วเสร็จ ให้ดำเนินการไอเทอเรชันบัสที่ 4 ต่อไป จนกระทั่งครบทุกบัสในระบบ และให้แทนค่าแรงดันที่ถูกต้องของบัสที่ได้ดำเนินการก่อนหน้านี้ลงในสมการเพื่อคำนวณหาแรงดันของบัสต่อไปเสมอ



การปฏิบัติการตามหลัก เศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลังให้ได้รับผลสำเร็จนั้น จะต้องมีการพิจารณาถึงความปลอดภัยสำหรับบุคลากรที่ปฏิบัติงานและอุปกรณ์หรือเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ รวมทั้งการจัดเตรียมการให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้าโดยปราศจากไฟฟ้าดับ (interruption) ด้วยราคาการลงทุนต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลงทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีราคาต่ำ เช่น ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในการผลิตไฟฟ้า ราคาของการติดตั้ง และราคาของเชื้อเพลิงสำหรับโรงจักรไฟฟ้าพลังความร้อน (thermal power plants) โดยตัวประกอบที่เกี่ยวข้องกับราคาของการผลิตไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 ส่วนคือ

1. ต้นทุนคงที่ (fixed cost)

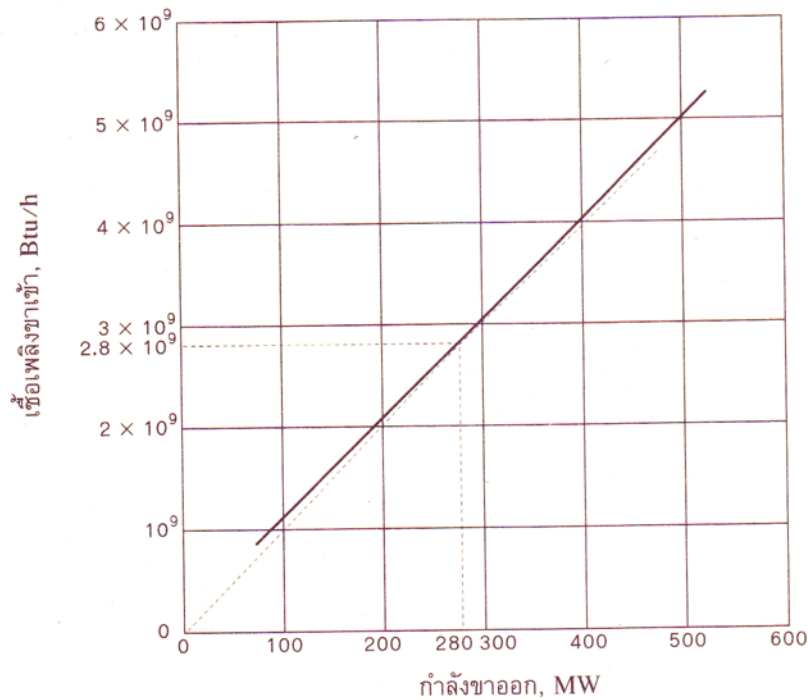
ต้นทุนคงที่จะรวมถึง งบประมาณการลงทุน (capital investment) อัตราดอกเบี้ย (interest charges) สำหรับเงินกู้ ค่าแรงงาน (labor) และภาษี (taxes)

2. ต้นทุนผันแปร (variable cost)

ต้นทุนผันแปรคือ ราคาความแตกต่างของเชื้อเพลิงหรืออัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมการไหลของกำลังสูญเสียเนื่องจากการไหลของกำลังรีแอกทีฟ การเดินเครื่องของโรงจักรไฟฟ้าพลังน้ำและพลังความร้อนให้สอดคล้องกับความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดรายวัน และราคาของการซื้อหรือขายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งต้นทุนเหล่านี้เป็นสิ่งที่ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการในศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าด้วยการเลือกเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับจ่ายโหลดในช่วงเวลาต่างๆ

4.1 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Efficiencies)

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิและความดันขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อน (heat - operated device) เช่น เครื่องกังหันไอน้ำ (steam turbine) จะสามารถเพิ่มพลังงานกลขาออกให้มากขึ้นได้ด้วยการเพิ่มพลังงานความร้อนขาเข้าในจำนวนเดียวกัน นี่คือเหตุผลพื้นฐานสำหรับการเพิ่มความดันและอุณหภูมิในเครื่องกังหันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลพลังความร้อนนี้สามารถหาได้โดยการวัดความร้อนขาเข้ากับพลังงานไฟฟ้าขาออก และเขียนผลลัพธ์ให้เป็นเส้นโค้งที่ไหลดต่างๆ กัน เส้นโค้งนี้เรียกว่า เส้นโค้งขาเข้า - ขาออก (input - output curves) โดยทั่วไปเส้นโค้งขาเข้า - ขาออกจะเขียนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงขาเข้าที่มีหน่วยเป็น Btu (หน่วยของความร้อนระบบอังกฤษ) ต่อเวลา 1 ชั่วโมง (Btu/h) กับ กำลังขาออกที่มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์หรือกิโลวัตต์ ซึ่งคุณสมบัติของเส้นโค้งนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นโค้งเชิงเส้น (linearly curve) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แกนตั้งของเส้นโค้งสามารถเปลี่ยน Btu/h ให้เป็นจำนวนเงินบาทหรือดอลลาร์ต่อชั่วโมงได้ โดยการคูณเชื้อเพลิงขาเข้าด้วยราคาของเชื้อเพลิงในอัตราบาทหรือดอลลาร์ต่อล้าน Btu



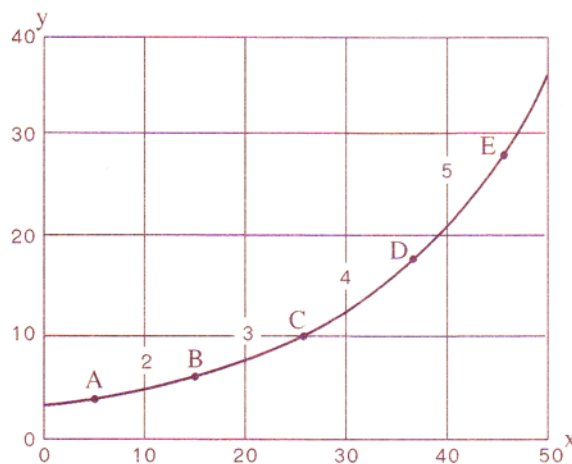
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งขาเข้า - ขาออกของหน่วยผลิตไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์ของเชื้อเพลิงขาเข้าและกำลังขาออก

ถ้าลากเส้นตรงผ่านจากจุดกำเนิดไปยังจุดใดๆที่เส้นโค้งขาเข้า-ขาออก ส่วนกลับของความชัน (slope) คือ กำลังขาออก (MW)หารด้วยเชื้อเพลิงขาเข้า (ล้าน Btu/h) หรืออัตราส่วนของพลังงานออกขาออก (MWh) ต่อเชื้อเพลิงขาเข้า (ล้าน Btu) ซึ่งอัตราส่วนนี้ก็คือ ประสิทธิภาพเชื้อเพลิง (fuel efficiency) เมื่อลากเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดไปสัมผัสจุดต่ำที่สุดของเส้นโค้งขาเข้า -ขาออก จุดนี้ก็คือจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ให้เส้นโค้งขาเข้า -ขาออก ตามรูปที่ 4.1 มีประสิทธิภาพสูงสุดที่กำลังขาออกประมาณ 280 MW ในขณะที่ต้องการเชื้อเพลิงขาเข้า 2.8×10^6 Btu/h นั่นคือต้องการเชื้อเพลิง 10.0×10^6 Btu/MWh เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังขาออกที่ 100 MW จะต้องการเชื้อเพลิง 11.0×10^6 Btu/MWh

4.2 ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Incremental Cost)

เราสามารถใช้อคณิตศาสตร์แสดงได้ว่า การใช้เชื้อเพลิงขาเข้าให้น้อยที่สุดสำหรับการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หน่วยจะเกิดขึ้นเมื่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองนั้นมีอัตราส่วนเพิ่มของความร้อน (incremental heat rates) เท่ากัน เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงมีราคาเป็นบาทหรือดอลลาร์ต่อล้าน Btu ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า “ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีต้นทุนส่วนเพิ่มเท่ากัน”

ความหมายของคำว่า “ส่วนเพิ่ม” (incremental) คือการเพิ่มเพียงเล็กน้อย และอัตราส่วนเพิ่ม (incremental rate) ใต้นิยามไว้ว่าเป็นความชันของเส้นโค้งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งแสดงการหาอัตราส่วนเพิ่ม

จากรูปที่ 4.2 เราสามารถพิจารณาให้ความยาวช่วงสั้นๆ ของเส้นโค้งให้เป็นเส้นตรงได้ ดังนั้นการเพิ่มค่าของแกน x จากค่า 10 ถึง 20 หรือระหว่างจุด 2 และ 3 ในขณะที่ค่าของแกน y จะมีการเพิ่มค่าจาก 6 ถึง 8 ดังนั้นความชันของเส้นโค้งส่วนนี้คือ อัตราส่วนของความแตกต่าง หรือ

$$\frac{(8 - 6)}{(20 - 10)} = 0.2$$

ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มค่าของแกน x จากค่า 30 ถึง 40 หรือระหว่างจุด 4 และจุด 5 ค่าของแกน y มีการเพิ่มจาก 13 ถึง 22 ความชันของเส้นโค้งส่วนนี้คือ

$$\frac{(22 - 13)}{(40 - 30)} = 0.9$$

ด้วยวิธีดังกล่าวนี้เราสามารถหาความชันของเส้นโค้งที่จุดอื่นๆ ได้ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งถ้าเราทำให้ความแตกต่างมีค่าน้อย จนกระทั่งอัตราส่วนเพิ่มเพียงเล็กน้อยนี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นก็คือพื้นฐานสำหรับการหาอนุพันธ์ (differential calculus) นั่นเอง

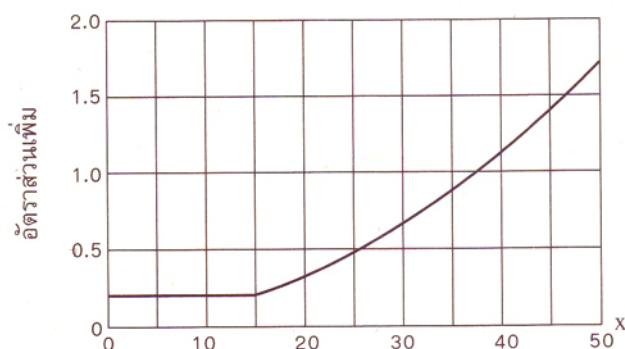
พิจารณารูปที่ 4.2 อีกครั้งหนึ่ง โดยก่อนหน้านี้นี้เราได้คำนวณหาอัตราส่วนเพิ่ม (ความชัน) ของจุด B และจุด D ไปแล้ว ดังนั้นความชันที่จุดอื่นๆ ที่เหลือมีค่าดังนี้

ความชันที่จุด A คือ $\frac{(6 - 4)}{(10 - 0)} = 0.2$

ความชันที่จุด C คือ $\frac{(13 - 8)}{(30 - 20)} = 0.5$

ความชันที่จุด E คือ $\frac{(36 - 22)}{(50 - 40)} = 1.4$

จากค่าความชันที่จุดต่างๆ สามารถนำมาเขียนเป็นเส้นโค้งอัตราส่วนเพิ่ม (incremental rate curve) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งแสดงการเปลี่ยนแปลงส่วนเพิ่มของการเพิ่มค่าในแกน x และ y ของเส้นโค้งในรูปที่ 4.2

ต้นทุนส่วนเพิ่มสามารถหาได้จากความชันของเส้นโค้งขาเข้า - ขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หน่วย ถ้าเราเขียนแกนตั้งของเส้นโค้งขาเข้า - ขาออกให้มีหน่วยเป็น บาทหรือดอลลาร์ต่อชั่วโมง และกำหนดให้

F_i คือ ราคาซื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i , บาทหรือดอลลาร์ต่อชั่วโมง ($\$/h$)

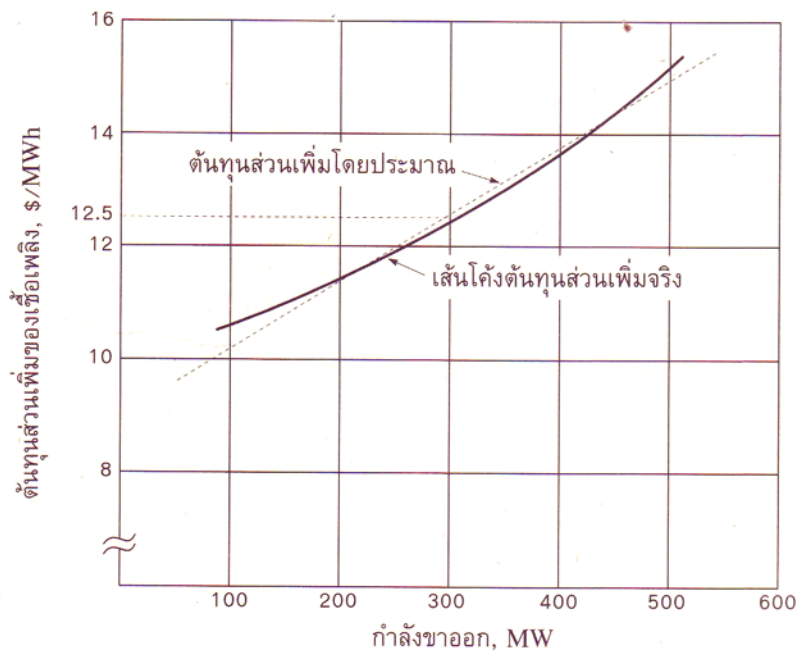
P_i คือ กำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ i , MW

ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ ที่ให้กำลังขาออกคือ ผลิต (limit) ของอัตราส่วนของการเพิ่มราคาซื้อเพลิงขาเข้า มีหน่วยเป็นบาทหรือดอลลาร์ต่อชั่วโมงต่อการเพิ่มของกำลังขาออกที่สอดคล้องกัน มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ โดยที่การเพิ่มของกำลังขาออกเข้าใกล้ศูนย์ หรือเขียนเป็น

$$\lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta P_i}$$

หรือ ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ dF_i/dP_i

จากการคำนวณหาค่าความชันของเส้นโค้งขาเข้า - ขาออกในรูปที่ 4.1 ทำให้สามารถนำค่าความชันเหล่านี้มาเขียนเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงและกำลังขาออกได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงกับกำลังขาออก สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเส้นโค้งขาเข้า - ขาออกตามรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.4 ได้แสดงต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงที่ให้กำลังขาออกค่าต่างๆ กัน สำหรับการวิเคราะห์ในทางปฏิบัติเราจะประมาณเส้นโค้งต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงให้เป็นเส้นตรง ดังที่เขียนเป็นเส้นประโดยสมการของเส้นประที่เป็นต้นทุนส่วนเพิ่มโดยประมาณคือ

$$\frac{dF_i}{dP_i} = 0.0126 P + 8.9$$

ดังนั้นที่ กำลังขาออก 300 MW ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงที่หาโดยวิธีประมาณมีค่าเท่ากับ \$12.68 ต่อ MWh แต่ต้นทุนส่วนเพิ่มจริงมีค่าเท่ากับ \$12.50 ต่อ MWh ซึ่งจุดของกำลังขาออกที่ได้ยกตัวอย่างมานี้เป็นจุดที่ใกล้จุดเบี่ยงเบนระหว่างค่าจริงและค่าประมาณของต้นทุนส่วนเพิ่มมากที่สุด สำหรับการที่จะเพิ่มความเที่ยงตรงให้มากขึ้นสามารถทำได้โดยการใช้เส้นตรงสองเส้นแทน โดยให้เส้นโค้งอยู่ระหว่างเส้นตรงทั้งสอง

4.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรไฟฟ้า (Economic Load Distribution Between Generators Within a Plant)

ถ้าสมมติให้โรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ 2 หน่วยต้องจ่ายโหลดจำนวนหนึ่ง โดยการแบ่งกันจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 หน่วย ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยหนึ่ง มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสูงกว่าอีกหน่วยหนึ่ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องถ่ายโอนโหลดที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสูงมาให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงต่ำกว่าจ่ายโหลดแทน การทำเช่นนี้จะมีผลให้ต้นทุนรวมของเชื้อเพลิงลดลง การถ่ายโอนโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงส่วนเพิ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 หน่วยมีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้เราสามารถนำมาใช้กับโรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 2 หน่วย ดังนั้นด้วยหลักเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรทุกหน่วยจะต้องเดินเครื่องให้มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงที่ค่าเดียวกัน

หลักเกณฑ์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ที่ได้กล่าวไปแล้ว เราสามารถที่จะพิสูจน์ได้ด้วยคณิตศาสตร์ สำหรับโรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า n หน่วย โดยกำหนดให้

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (4.1)$$

$$P_R = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.2)$$

เมื่อ F_T คือ ต้นทุนรวมของเชื้อเพลิง
 P_R คือ กำลังขาออกรวมที่ได้รับจากบัสของโรงจักรไฟฟ้าและจ่ายเข้าระบบไฟฟ้า
 F_i คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วย
 P_i คือ กำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยที่สอดคล้องกับเชื้อเพลิง

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

จุดประสงค์ของเราต้องการที่จะจ่ายโหลดรวม P_R โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า n หน่วย เพื่อให้ได้ต้นทุนรวมของเชื้อเพลิง F_T ต่ำที่สุด ซึ่งเราจะต้องทำให้อนุพันธ์รวม (total differential) $dF_T = 0$ ดังนั้นต้นทุนรวมของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วย ดังนี้

$$dF_T = \frac{\partial F_T}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial F_T}{\partial P_2} dP_2 + \dots + \frac{\partial F_T}{\partial P_n} dP_n = 0 \quad (4.3)$$

เมื่อต้นทุนรวมของเชื้อเพลิง F_T ขึ้นอยู่กับกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยต่าง ๆ ดังนั้นกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจะเปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อรวมกำลังไฟฟ้าขาออกแล้วต้องมีค่าคงที่เท่ากับ P_R หรือ $dP_R = 0$ ดังนั้น

$$dP_1 + dP_2 + \dots + dP_n = 0 \quad (4.4)$$

คูณสมการที่ (4.4) ด้วย λ และนำไปลบออกจากสมการที่ (4.3) จะได้

$$\left(\frac{\partial F_T}{\partial P_1} - \lambda \right) dP_1 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_2} - \lambda \right) dP_2 + \dots + \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_n} - \lambda \right) dP_n = 0 \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) จะมีความสอดคล้องกันถ้าแต่ละเทอมมีค่าเป็นศูนย์ในแต่ละอนุพันธ์บางส่วน จะกลายเป็นอนุพันธ์เมื่อต้นทุนของเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยใดหน่วยหนึ่งแปรเปลี่ยนไป และกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยนั้นแปรเปลี่ยนไปด้วย ตัวอย่างเช่น $\frac{\partial F_T}{\partial P_n}$ จะกลายเป็น dF_n/dP_n สมการที่ (4.5) จะมีความสอดคล้องกัน เมื่อ

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda, \quad \frac{dF_2}{dP_2} = \lambda, \quad \dots, \quad \frac{dF_n}{dP_n} = \lambda \quad (4.6)$$

และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกหน่วยต้องเดินเครื่องที่ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิง (λ) เดียวกันเพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุด ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงมานี้เป็นวิธีที่รู้จักกันดีคือตัวคูณลากรองจ์เจียน (Lagrangian multipliers)

ตัวอย่างที่ 4.1 ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิง (\$/MWh) สำหรับโรงจักรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หน่วย ซึ่งมีค่าเป็น

$$\lambda_1 = \frac{dF_1}{dP_1} = 0.0080 P_1 + 8.0$$

$$\lambda_2 = \frac{dF_2}{dP_2} = 0.0096 P_2 + 6.4$$

สมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 หน่วยเดินเครื่องตลอดเวลา โดยโหลรวมมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 250 ถึง 1250 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยสามารถจ่ายโหลได้สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 625 และ 100 MW ตามลำดับ จงคำนวณหาต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงและกำลังการผลิตระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 หน่วย เพื่อให้ได้ราคาต้นทุนต่ำสุดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลรวม

วิธีทำ เมื่อพิจารณาที่โหลน้อยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 จะมีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสูงกว่า และเมื่อเดินเครื่องเพื่อจ่ายโหลที่ขีดจำกัดต่ำสุด 100 MW จะมีค่าต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงดังนี้

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.0080 (100) + 8.0 = \$8.8 /MWh$$

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 เดินเครื่องที่ 100 MW เช่นเดียวกัน

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 0.0096 (100) + 6.4 = \$7.36 /MWh$$

ดังนั้นเมื่อโรงจักรไฟฟ้าต้องจ่ายโหลเพิ่มขึ้น จะต้องจ่ายโหลโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 จนกระทั่งมีค่าต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิง dF_2/dP_2 เท่ากับ $\$8.8 /MWh$ ซึ่งกว่าจะถึงจุดที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงเท่ากันทั้ง 2 หน่วย การหาต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของโรงจักรไฟฟ้าจะหาโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 เพียงหน่วยเดียว

เมื่อโรงจักรไฟฟ้ามีโหล 250 MW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 ต้องจ่ายโหลเพิ่มขึ้นอีก 50 MW รวมเป็น 150 MW จึงทำให้มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงมีค่าเป็น

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 0.0096 (150) + 6.4 = \$7.84/MWh$$



และถ้าต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 มีค่าเป็น \$8.8 / MWh โดยโหลดที่ต้องจ่ายคือ

$$0.0096 P_2 + 6.4 = 8.8$$

$$P_2 = \frac{2.4}{0.0096} = 250 \text{ MW}$$

ดังนั้นที่ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของโรงจักรไฟฟ้า $\lambda = \$8.8 / \text{MWh}$ โรงจักรไฟฟ้าจะจ่ายโหลดเท่ากับ

$$P_1 + P_2 = 100 + 250$$

$$= 350 \text{ MW}$$

ตั้งแต่จุดนี้เป็นต้นไปการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยให้ประหยัดที่สุดนั้นสามารถหาได้โดยการสมมติค่าของ λ ให้มีค่าต่างๆ กันและคำนวณกำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยและกำลังขาออกรวมของโรงจักรไฟฟ้า ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.1

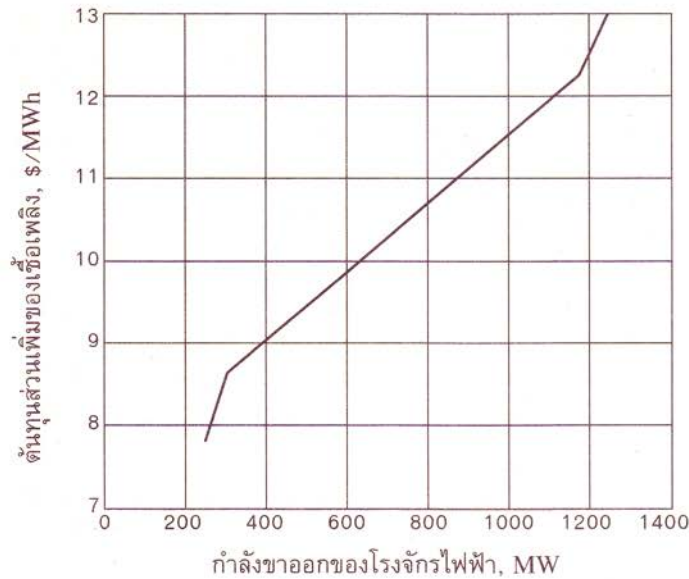
ตารางที่ 4.1 กำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วย และกำลังขาออกรวมโดยการแปรค่า λ ต่างๆ กัน สำหรับตัวอย่างที่ 4.1

| λ ของโรงจักร \$/MWh | หน่วยที่ 1 P_1 MW | หน่วยที่ 2 P_2 MW | โรงจักรไฟฟ้า $P_1 + P_2$ MW |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 7.84 | 100 | 150 | 250 |
| 8.8 | 100 | 250 | 350 |
| 9.6 | 200 | 333 | 533 |
| 10.4 | 300 | 417 | 717 |
| 11.2 | 400 | 500 | 900 |
| 12.0 | 500 | 583 | 1083 |
| 12.4 | 550 | 625 | 1175 |
| 13.0 | 625 | 625 | 1250 |

รูปที่ 4.5 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของโรงจักร λ กับกำลังขาออกของโรงจักรที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ที่ $\lambda = 12.4$ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 จะเดินเครื่องเพื่อจ่ายโหลดด้วยขีดจำกัดของกำลังสูงสุด และโหลดส่วนที่เหลือจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 ซึ่งค่ากำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยสามารถคำนวณได้โดยต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของโรงจักรไฟฟ้า λ คือ

$$P_1 = \frac{12.4 - 8.0}{0.0080} = 550 \text{ MW}$$

$$P_2 = \frac{12.4 - 6.4}{0.0096} = 625 \text{ MW}$$



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงกับกำลังขาออกของโรงจักรไฟฟ้า โดยการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยอย่างประหยัด ตามที่คำนวณในตัวอย่างที่ 4.1

ตัวอย่างที่ 4.2 จากตัวอย่างที่ 4.1 ถ้าโรงจักรไฟฟ้าต้องจ่ายโหลด 1000 MW จงคำนวณการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงจักรให้มีความประหยัดที่สุด

วิธีทำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจะต้องจ่ายโหลดรวมคือ

$$P_1 + P_2 = 1000 \text{ MW}$$

จากหลักเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเดินเครื่องให้มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงเป็นค่าเดียวกัน ดังนั้น

$$\lambda_1 = \lambda_2$$

$$0.008 P_1 + 8.0 = 0.0096 (1000 - P_1) + 6.4$$

$$0.0176 P_1 = 8.0$$

$$P_1 = \frac{8.0}{0.0176} = 454.55 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad P_2 &= 1000 - 454.55 \\ &= 545.45 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 จ่ายโหลด} = 454.55 \text{ MW} \\
& \text{เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 จ่ายโหลด} = 545.45 \text{ MW} \\
& \text{โดยมีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของโรงจักร } \lambda = 0.008 (454.55) + 8.0 \\
& = 11.6364 \text{ } \quad \text{ตอบ}
\end{aligned}$$

การจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามหลักเศรษฐศาสตร์ จะเกิดผลให้มีความประหยัดมากกว่าการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามความพอใจของตัวเอง ค่าของความประหยัดสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตเทอมต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงและเปรียบเทียบกับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของต้นทุนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดแตกต่างกันไปจากจุดการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ตัวอย่างที่ 4.3 จงหาค่าความประหยัดของต้นทุนเชื้อเพลิง (\$/h) สำหรับการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีโหลดรวม 900 MW ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หน่วย ในโรงจักรไฟฟ้าตามตัวอย่างที่ 4.1 และเปรียบเทียบกับการแบ่งกันจ่ายโหลดที่เท่ากันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองที่ค่าโหลดรวมเดียวกัน

วิธีทำ

จากตารางที่ 4.1 โหลดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองต้องจ่ายรวม 900 MW ได้มีการแบ่งกันจ่ายโหลดเพื่อให้เกิดความประหยัดดังนี้

$$\begin{aligned}
& \text{เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 จ่ายโหลด} = 400 \text{ MW} \\
& \text{เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 จ่ายโหลด} = 500 \text{ MW}
\end{aligned}$$

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจ่ายโหลดเท่ากันคือ 450 MW จะทำให้ต้นทุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 เพิ่มขึ้นดังนี้



$$\begin{aligned}
\int_{400}^{450} (0.008 P_1 + 8) dP_1 &= 0.008 \int_{400}^{450} P_1 dP_1 + 8 \int_{400}^{450} dP_1 \\
&= \frac{0.008}{2} P_1^2 \Big|_{400}^{450} + 8 P_1 \Big|_{400}^{450} \\
&= 0.004 P_1^2 \Big|_{400}^{450} + 8 P_1 \Big|_{400}^{450} \\
&= \$570 /h
\end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2

$$\begin{aligned}
\int_{500}^{450} (0.0096 P_2 + 6.4) dP_2 &= 0.0096 \int_{500}^{450} P_2 dP_2 + 6.4 \int_{500}^{450} dP_2 \\
&= \frac{0.0096}{2} P_2^2 \Big|_{500}^{450} + 6.4 P_2 \Big|_{500}^{450} \\
&= 0.0048 P_2^2 \Big|_{500}^{450} + 6.4 P_2 \Big|_{500}^{450} \\
&= -\$548 /h
\end{aligned}$$

เครื่องหมายลบจะหมายถึงการลดลงของต้นทุน จากการอินทิเกรตจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของต้นทุนคือ

$$570 - 548 = \$22 /h$$

ดังนั้นการเดินเครื่องเพื่อจ่ายโหลดตามหลักเศรษฐศาสตร์นี้สามารถประหยัดต้นทุนได้ \$22 /h ซึ่งดูเหมือนว่ามีค่าเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถประหยัดได้ทุกชั่วโมง ถ้าเป็นการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ปี จะทำให้ลดต้นทุนของเชื้อเพลิงได้ \$ 192,720 หรือประมาณ 4.818 ล้านบาท

ตัวอย่างที่ 4.4 โรงจักรไฟฟ้าแห่งหนึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ 2 หน่วย จ่ายกำลังให้กับโหลดตลอดในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ระหว่าง 240 ถึง 1000 MW ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยสามารถรับโหลดเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 120 ถึง 600 MW และมีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{dF_1}{dP_1} &= 0.008 P_1 + 8.5 \\
\frac{dF_2}{dP_2} &= 0.009 P_2 + 6.5
\end{aligned}$$

จงคำนวณหา

ก. กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยแบ่งกันจ่ายให้กับโหลด โดยมีต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุด และให้โรงจักรไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มพิกัด

ข. ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วย

ค. ที่กำลังขาออกสูงสุดของโรงจักร จงหามูลค่าความประหยัด (\$/h) โดยเปรียบเทียบระหว่างการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างประหยัดกับการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจ่ายโหลดอย่างละครึ่ง

วิธีทำ

ก. กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจ่ายให้กับโหลด

กำลังสูงสุดของโรงจักรไฟฟ้าคือ

$$P_1 + P_2 = 1000 \quad (1)$$

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดแต่ละหน่วยจ่ายโหลดอย่างประหยัดคือ

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2}$$

$$0.008 P_1 + 8.5 = 0.009 P_2 + 6.5$$

$$0.008 P_1 - 0.009 P_2 = -2 \quad (2)$$

นำ (2) ทหารด้วย 0.008 แล้วนำไปลบออกจาก (1) จะได้

$$2.125 P_2 = 1250$$

$$P_2 = 588.24 \text{ MW}$$

ดังนั้น

$$P_1 = 1000 - 588.24 = 411.76 \text{ MW}$$

การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้มีต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุดนั้น จะต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยจ่ายโหลดดังนี้

$$P_1 = 411.76 \text{ MW} \text{ และ } P_2 = 588.24 \text{ MW}$$

ข. ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned}\lambda &= 0.008 P_1 + 8.5 = (0.008)(411.76) + 8.5 \\ &= \$11.79 /MWh\end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned}\lambda &= 0.009 P_2 + 6.5 = (0.009)(588.24) + 6.5 \\ &= \$11.79 /MWh\end{aligned}$$

ค. มูลค่าที่สามารถประหยัดต้นทุนได้ต่อชั่วโมง

การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างประหยัดเราจะได้ $P_1 = 411.76$ MW และ $P_2 = 588.24$ MW แต่ถ้าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดอย่างละครึ่งคือ $P_1 = P_2 = 500$ MW ดังนั้น

ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 1 คือ

$$\begin{aligned}\int_{411.76}^{500} (0.008 P_1 + 8.5) dP_1 &= \left. \frac{0.008}{2} P_1^2 + 8.5 P_1 \right|_{411.76}^{500} \\ &= \$1071.85 /h\end{aligned}$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยที่ 2 จะมีต้นทุนลดลง ดังนี้

$$\begin{aligned}\int_{588.24}^{500} (0.009 P_2 + 6.5) dP_2 &= \left. \frac{0.009}{2} P_2^2 + 6.5 P_2 \right|_{588.24}^{500} \\ &= -\$1005.68 /h\end{aligned}$$

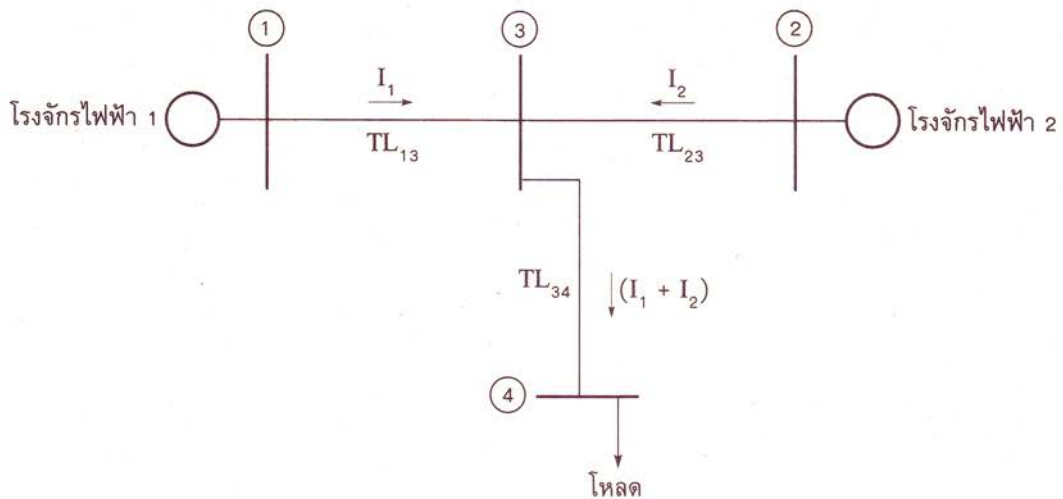
ดังนั้นการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบ่งจ่ายโหลดอย่างละครึ่งสามารถประหยัดต้นทุนได้ดังนี้

$$1071.85 - 1005.68 = \$66.17 /h$$

ตอบ

4.4 การสูญเสียในระบบส่ง (Transmission Losses)

การกำหนดการจ่ายโหลดอย่างประหยัดระหว่างโรงจักรไฟฟ้า เรามีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาการสูญเสียในสายส่งด้วย ถึงแม้ว่าโรงจักรไฟฟ้าหนึ่งอาจมีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงต่ำกว่าอีกโรงจักรไฟฟ้าหนึ่งก็ตาม แต่โรงจักรไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงต่ำกว่านี้ตั้งอยู่ห่างไกลจากศูนย์กลางโหลดมากกว่าอีกโรงจักรหนึ่ง ดังนั้นในการจ่ายโหลดอย่างประหยัดระหว่างโรงจักรไฟฟ้าเมื่อพิจารณาการสูญเสียในสายส่งเข้าไปด้วย อาจจะต้องลดการจ่ายโหลดด้วยโรงจักรไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มน้อย และให้โรงจักรไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มมากกว่าจ่ายโหลดแทนก็ได้



รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบโรงจักรไฟฟ้า 2 โรงและจ่ายไฟฟ้าไปสู่โหลด

พิจารณารูปที่ 4.6 ถ้า R_a , R_b และ R_c เป็นความต้านทานของสายส่ง TL_{13} , TL_{23} และ TL_{34} ตามลำดับ กำลังสูญเสียของระบบส่ง 3 เฟสนี้คือ

$$P_L = 3 |I_1|^2 R_a + 3 |I_2|^2 R_b + 3 |I_1 + I_2|^2 R_c \quad (4.7)$$

ถ้าสมมติให้กระแส I_1 และ I_2 มีเฟสเดียวกัน ดังนั้น

$$|I_1 + I_2| = |I_1| + |I_2| \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) จัดสมการให้ง่ายขึ้นจะได้

$$P_L = 3 |I_1|^2 (R_a + R_c) + 3 \times 2 |I_1| |I_2| R_c + 3 |I_2|^2 (R_b + R_c) \quad (4.9)$$

ถ้ากำหนดให้

P_1 คือ กำลังขาออก 3 เฟสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 1

P_2 คือ กำลังขาออก 3 เฟสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 2

pf_1 คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ที่บัสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 1

pf_2 คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ที่บัสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 2

V_1 คือ แรงดันที่บัสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 1

V_2 คือ แรงดันที่บัสของโรงจักรไฟฟ้าที่ 2

ดังนั้นสามารถหาค่ากระแส I_2 และ I_1 ได้คือ

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} |V_1| \text{pf}_1} \quad \text{และ} \quad I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} |V_2| \text{pf}_2} \quad (4.10)$$

นำสมการที่ (4.10) แทนลงในสมการที่ (4.9) เราจะได้

$$\begin{aligned} P_L &= P_1^2 \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2 (\text{pf}_1)^2} + 2P_1 P_2 \frac{R_c}{|V_1| |V_2| (\text{pf}_1)(\text{pf}_2)} + P_2^2 \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2 (\text{pf}_2)^2} \\ &= P_1^2 B_{11} + 2 P_1 P_2 B_{12} + P_2^2 B_{22} \end{aligned} \quad (4.11)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} B_{11} &= \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2 (\text{pf}_1)^2} \\ B_{12} &= \frac{R_c}{|V_1| |V_2| (\text{pf}_1)(\text{pf}_2)} \\ B_{22} &= \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2 (\text{pf}_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

เทอม B_{11} , B_{12} และ B_{22} เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficients) หรือ สัมประสิทธิ์ B (B coefficients) และถ้าแรงดันในสมการที่ (4.12) เป็นแรงดันระหว่างไลน์ที่มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ และความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม ดังนั้นหน่วยของสัมประสิทธิ์การสูญเสียคือ ส่วนกลับของเมกะวัตต์ ดังนั้นในสมการที่ (4.11) กำลังไฟฟ้า 3 เฟส P_1 และ P_2 มีหน่วยเป็น เมกะวัตต์ ซึ่ง P_L ก็มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ด้วยเช่นเดียวกัน และการคำนวณอาจทำให้อยู่ในระบบ เปอร์ยูนิต

ตัวอย่างที่ 4.5 จากแผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.6 สมมติให้กระแส $I_1 = 1.0 \angle 0^\circ$ pu และ $I_2 = 0.8 \angle 0^\circ$ pu ถ้าแรงดันที่บัส 3 คือ $V_3 = 1.0 \angle 0^\circ$ pu ให้หาสัมประสิทธิ์การสูญเสีย โดยอิมพีแดนซ์ของสายส่ง TL_{12} , TL_{23} และ TL_{34} คือ $0.04 + j 0.16$ pu, $0.03 + j 0.12$ pu และ $0.02 + j 0.08$ pu ตามลำดับ

วิธีทำ แรงดันที่บัส 1 และบัส 2 คือ

$$\begin{aligned} V_1 &= V_3 + I_1 Z_a \\ &= 1.0 + (1.0 + j0)(0.04 + j 0.16) \\ &= 1.04 + j 0.16 = 1.05 \angle 8.75^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_2 &= V_3 + I_2 Z_b \\
&= 1.0 + (0.8 + j0)(0.03 + j 0.12) \\
&= 1.024 + j 0.096 = 1.03 \angle 5.36^\circ \text{ pu}
\end{aligned}$$

เนื่องจากกระแสทั้งหมดมีมุมเฟสเป็นศูนย์ ดังนั้นเพาเวอร์แฟกเตอร์ของแต่ละบัสคือ โคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันที่บัสนั้น นั่นคือ

$$\begin{aligned}
pf_1 &= \cos 8.75^\circ = 0.98 \\
pf_2 &= \cos 5.36^\circ = 0.99
\end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

$$\begin{aligned}
B_{11} &= \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2 (pf_1)^2} \\
&= \frac{0.04 + 0.02}{(1.05)^2 (0.98)^2} = 0.056 \text{ pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{12} &= \frac{R_c}{|V_1| |V_2| (pf_1)(pf_2)} \\
&= \frac{0.02}{1.05 \times 1.03 \times (0.98)(0.99)} = 0.019 \text{ pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{22} &= \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2 (pf_2)^2} \\
&= \frac{0.03 + 0.02}{(1.03)^2 (0.99)^2} = 0.048 \text{ pu}
\end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 4.6 จงคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งสำหรับตัวอย่างที่ 4.5 โดยใช้สูตรตามสมการที่ (4.11) และตรวจสอบผลลัพธ์

วิธีทำ

กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2 คือ

$$\begin{aligned}
P_1 &= R_e \{I_1 V_1\} \\
&= R_e \{(1.0 + j0)(1.04 + j 0.16)\} \\
&= 1.04 \text{ pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_3 + I_2 Z_b \\
 &= 1.0 + (0.8 + j0)(0.03 + j 0.12) \\
 &= 1.024 + j 0.096 = 1.03 \angle 5.36^\circ \text{ pu}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากกระแสทั้งหมดมีมุมเฟสเป็นศูนย์ ดังนั้นเพาเวอร์แฟกเตอร์ของแต่ละบัสคือ โคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันที่บัสนั้น นั่นคือ

$$pf_1 = \cos 8.75^\circ = 0.98$$

$$pf_2 = \cos 5.36^\circ = 0.99$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2 (pf_1)^2} \\
 &= \frac{0.04 + 0.02}{(1.05)^2 (0.98)^2} = 0.056 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{12} &= \frac{R_c}{|V_1| |V_2| (pf_1)(pf_2)} \\
 &= \frac{0.02}{1.05 \times 1.03 \times (0.98)(0.99)} = 0.019 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{22} &= \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2 (pf_2)^2} \\
 &= \frac{0.03 + 0.02}{(1.03)^2 (0.99)^2} = 0.048 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 4.6 จงคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งสำหรับตัวอย่างที่ 4.5 โดยใช้สูตรตามสมการที่ (4.11) และตรวจสอบผลลัพธ์

วิธีทำ

กำลังไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2 คือ

$$\begin{aligned}
 P_1 &= R_e \{I_1 V_1\} \\
 &= R_e \{(1.0 + j0)(1.04 + j 0.16)\} \\
 &= 1.04 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_2 &= R_e \{I_2 V_2\} \\
&= R_e \{(0.8 + j 0)(1.024 + j 0.096)\} \\
&= 0.8192 \text{ pu}
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (4.11)

$$\begin{aligned}
P_L &= P_1^2 B_{11} + 2P_1 P_2 B_{12} + P_2^2 B_{22} \\
&= (1.04^2 \times 0.056) + (2 \times 1.04 \times 0.8192 \times 0.019) \\
&\quad + (0.8192^2 \times 0.048) \\
&= 0.06 + 0.032 + 0.032 \\
&= 0.124 \text{ pu}
\end{aligned}$$

ตอบ

ตรวจสอบผลลัพธ์โดยการคำนวณกำลังสูญเสียในสายส่งแต่ละส่วน จะได้

$$\begin{aligned}
P_L &= I_1^2 R_a + I_2^2 R_b + (I_1 + I_2)^2 R_c \\
&= (1.0^2 \times 0.04) + (0.8^2 \times 0.03) + (1.8^2 \times 0.02) \\
&= 0.04 + 0.0192 + 0.0648 \\
&= 0.124 \text{ pu}
\end{aligned}$$

ตอบ

รูปแบบทั่วไปของสมการกำลังสูญเสีย (loss equation) สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีจำนวนใดๆ คือ

$$P_L = \sum_j \sum_i P_j B_{ji} P_i \quad (4.13)$$

เมื่อ \sum_j และ \sum_i คือ การรวมแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด

ตัวอย่างเช่น ถ้ามีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 3 แหล่ง จะได้

$$\begin{aligned}
P_L &= P_1^2 B_{11} + P_2^2 B_{22} + P_3^2 B_{33} + 2P_1 P_2 B_{12} \\
&\quad + 2P_2 P_3 B_{23} + 2P_1 P_3 B_{13}
\end{aligned} \quad (4.14)$$

ถ้าเขียนอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ สมการกำลังสูญเสียของสายส่งคือ

$$P_L = \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (4.15)$$

เมื่อมีแหล่งจ่ายทั้งหมด S แหล่ง

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ P_S \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \cdots & B_{1S} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \cdots & B_{2S} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{S1} & B_{S2} & B_{S3} & \cdots & B_{SS} \end{bmatrix}$$

4.5 การจ่ายโหลดระหว่างโรงจักรไฟฟ้า (Distribution of Load Between Plants)

วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจ่ายโหลดระหว่างโรงจักรไฟฟ้างก็คล้ายกับการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรไฟฟ้า เพียงแต่เราจะต้องนำกำลังสูญเสียในระบบส่งเข้ามาพิจารณาด้วย

จากสมการ

$$F_T = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (4.16)$$

เมื่อ F_T คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงรวมทั้งระบบ

F_i คือ ต้นทุนรวมของเชื้อเพลิงในแต่ละโรงจักรไฟฟ้า

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

กำลังไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบคือ

$$P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.17)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจากแต่ละโรงจักรไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

ต้นทุนของเชื้อเพลิงรวมทั้งระบบคือ ฟังก์ชันของกำลังขาเข้า สำหรับเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์กับค่าต่ำสุดของต้นทุนของเชื้อเพลิงรวมทั้งระบบ F_T คือ

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_L - P_R = 0 \quad (4.18)$$

เมื่อ P_R คือ กำลังไฟฟารวมที่โหลดในระบบได้รับ

P_L คือ กำลังสูญเสียในสายส่ง

สำหรับ P_R จะเป็นค่าคงที่จึงทำให้ $dP_R = 0$ ดังนั้น

$$\sum_{i=1}^n dP_i - dP_L = 0 \quad (4.19)$$

และเมื่อราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุดโดย $dF_T = 0$ ดังนั้น

$$dF_T = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F_T}{\partial P_i} dP_i = 0 \quad (4.20)$$

กำลังสูญเสียในสายส่ง P_L จะขึ้นอยู่กับกำลังขาออกของโรงจักรไฟฟ้า ดังนั้น

$$dP_L = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_L}{\partial P_i} dP_i \quad (4.21)$$

แทนค่า dP_L จากสมการที่ (4.21) ลงในสมการที่ (4.19) แล้วนำไปคูณด้วย λ และจึงนำไปลบออกจากสมการที่ (4.20) จะได้ผลเป็นสมการ

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_i} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \lambda \right) dP_i = 0 \quad (4.22)$$

สมการนี้จะมีความสอดคล้องกับสมการ

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_i} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \lambda = 0 \quad (4.23)$$

สำหรับทุกๆ ค่าของ i

จัดเรียงสมการที่ (4.23) และการเปลี่ยนกำลังขาออกโรงจักรไฟฟ้าเพียงหนึ่งโรงจักรก็จะสามารถไปมีผลต่อต้นทุนของโรงจักรไฟฟ้านั้น ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{1 - \partial P_L / \partial P_i} = \lambda \quad (4.24)$$

หรือ
$$\frac{dF_i}{dP_i} L_i = \lambda \quad (4.25)$$

เมื่อ L_i เรียกว่า *เพนัลตีแฟกเตอร์ (penalty factor)* ของโรงจักรไฟฟ้า i และ

$$L_i = \frac{1}{1 - \partial P_L / \partial P_i} \quad (4.26)$$

เมื่อ ตัวคูณ λ มีหน่วยเป็นบาทหรือดอลลาร์ต่อเมกะวัตต์ - ชั่วโมง
 ต้นทุนของเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็นบาทหรือดอลลาร์ต่อชั่วโมง
 และกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเมกะวัตต์

จะเห็นว่าผลของการเดินเครื่องระหว่างโรงจักรไฟฟ้าจะคล้ายกับการเดินเครื่องระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรไฟฟ้า โดยต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุดจะได้รับเมื่อต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงคูณด้วยเพนัลตีแฟกเตอร์ของโรงจักรไฟฟ้าเองมีค่าเท่ากับทุกโรงจักรไฟฟ้าในระบบ ผลคูณนี้คือ λ ตัวอย่างเช่น ถ้าในระบบมีโรงจักรไฟฟ้า 3 โรง การเดินเครื่องระหว่างโรงจักรเพื่อให้ต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุดได้ก็คือเมื่อ

$$\frac{dF_1}{dP_1} L_1 = \frac{dF_2}{dP_2} L_2 = \frac{dF_3}{dP_3} L_3 = \lambda \quad (4.27)$$

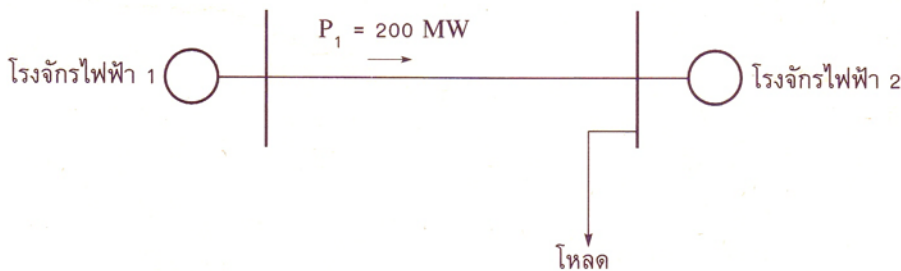
สำหรับกำลังสูญเสียในสายส่ง P_L จากสมการที่ (4.13) ที่จ่ายไฟฟ้าจาก n โรงจักรจะมีค่าอนุพันธ์บางส่วนเมื่อเทียบกับ P_i ดังนี้

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n P_j B_{ji} P_i = 2 \sum_{j=1}^n P_j B_{ji} \quad (4.28)$$

ตัวอย่างที่ 4.7 ระบบไฟฟ้าประกอบด้วยโรงจักรไฟฟ้า 2 โรง ต่อถึงกันด้วยสายส่งโดยมีโหลดต่ออยู่ที่บัสของโรงจักรไฟฟ้า 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถ้าโรงจักรไฟฟ้า 1 จ่ายโหลด 200 MW มายังโรงจักรไฟฟ้า 2 ทำให้มีกำลังสูญเสียในสายส่ง 16 MW จงหากำลังผลิตของแต่ละโรงจักรไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ เมื่อ λ ของระบบคือ \$12.50 /MWh สมมติให้ต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงของแต่ละโรงจักรไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.010 P_1 + 8.5$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 0.015 P_2 + 9.5$$



รูปที่ 4.7 ระบบไฟฟ้า

วิธีทำ

ระบบไฟฟ้าที่มีโรงจักรไฟฟ้า 2 โรง กำลังสูญเสียในสายส่งคือ

$$P_L = P_1^2 B_{11} + P_2^2 B_{22} + 2P_1 P_2 B_{12}$$

เนื่องจากโหลดทั้งหมดตั้งอยู่ที่บัส 2 ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ P_2 จะไม่มีผลกระทบต่อ P_L ดังนั้น

$$B_{22} = 0 \quad \text{และ} \quad B_{12} = 0$$

เมื่อ $P_1 = 200 \text{ MW}$ และ $P_L = 16 \text{ MW}$ ดังนั้น

$$16 = 200^2 B_{11}$$

$$B_{11} = 0.0004 \text{ MW}^{-1}$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_L}{\partial P_1} &= \frac{\partial}{\partial P_1} (P_1^2 B_{11} + 2P_1 P_2 B_{12}) \\ &= 2P_1 B_{11} + 2P_2 B_{12} \\ &= 2 \times 0.0004 P_1 + 0 = 0.0008 P_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_L}{\partial P_2} &= \frac{\partial}{\partial P_2} (P_2^2 B_{22} + 2P_1 P_2 B_{12}) \\ &= 2P_2 B_{22} + 2P_1 B_{12} = 0 \end{aligned}$$

เพนนัลตีแฟกเตอร์คือ

$$L_i = \frac{1}{1 - \partial P_L / \partial P_i}$$

$$L_1 = \frac{1}{1 - 0.0008 P_1}$$

และ

$$L_2 = \frac{1}{1 - 0} = 1.0$$

จากระบบมี $\lambda = 12.50$ เมื่อ

$$\frac{dF_1}{dP_1} L_1 = \lambda$$

ดังนั้น

$$\frac{0.010 P_1 + 8.5}{1 - 0.0008 P_1} = 12.50$$

$$P_1 = 200 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} L_2 = \lambda$$

$$\text{และ } 0.015 P_2 + 9.5 = 12.50$$

$$P_2 = 200 \text{ MW}$$

จากระบบตามรูปที่ 4.7 โรงจักรไฟฟ้าแต่ละโรงจะแบ่งจ่ายโหลดเท่ากัน สำหรับ λ ของระบบเท่ากับ 12.50 จึงจะมีต้นทุนของเชื้อเพลิงต่ำสุด

กำลังสูญเสียในสายส่งคือ

$$P_L = P_1^2 B_{11}$$

$$\begin{aligned} P_L &= 200^2 \times 0.0004 \\ &= 16 \text{ MW} \end{aligned}$$

ตอบ

กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับคือ

$$\begin{aligned} P_R &= P_1 + P_2 - P_L \\ &= 400 - 16 \\ &= 384 \text{ MW} \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 4.8 จากระบบไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4.7 กำลังที่โหลดได้รับคือ 384 MW จงคำนวณหาค่าความประหยัด (\$/h) ที่ได้รับ โดยไม่ต้องคิดกำลังสูญเสียในสายส่ง

วิธีทำ

ถ้าไม่คิดกำลังสูญเสียในสายส่ง ดังนั้นต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงที่โรงจักรไฟฟ้าทั้งสองจะมีค่าเท่ากันคือ $dF_1/dP_1 = dF_2/dP_2$ (จากหัวข้อที่ 4.3) จะได้

$$0.010 P_1 + 8.5 = 0.015 P_2 + 9.5 \quad (1)$$

กำลังที่ส่งไปยังโหลดคือ

$$P_1 + P_2 - P_L = P_1 + P_2 - 0.0004 P_1^2 = 384 \quad (2)$$

แก้สมการที่ (1) และสมการที่ (2) จะได้

$$P_1 = 290.7 \text{ MW} \quad \text{และ} \quad P_2 = 127.1 \text{ MW}$$

จะเห็นได้ว่ากำลังที่โรงจักรไฟฟ้าที่ 1 จะต้องจ่ายเพิ่มให้กับโหลดจาก 200 MW เป็น 290.7 MW ดังนั้นต้นทุนส่วนเพิ่มจะต้องมีค่ามากขึ้นคือ

$$\begin{aligned} \int_{200}^{290.7} (0.010 P_1 + 8.5) dP_1 &= \left. \frac{0.010}{2} P_1^2 + 8.5 P_1 \right|_{200}^{290.7} \\ &= 222.53 + 770.95 = 993.48 \end{aligned}$$

และที่โรงจักรไฟฟ้า 2 จะจ่ายโหลดลดลงจาก 200 MW เป็น 127.1 MW ดังนั้นต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงจะลดลงดังนี้

$$\begin{aligned} - \int_{200}^{127.1} (0.015 P_2 + 9.5) dP_2 &= \left. \frac{0.015}{2} P_2^2 + 9.5 P_2 \right|_{200}^{127.1} \\ &= 178.84 + 692.55 = 871.39 \end{aligned}$$

ดังนั้นความประหยัดที่ได้รับจากการจ่ายโหลด 384 MW มีค่า

$$993.84 - 871.39 = \$ 122.09 \text{ ต่อชั่วโมง}$$

ตอบ





การศึกษาฟอลต์แบบสมมาตร

โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานกันอยู่จะเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟสสมมูล ซึ่งสิ่งหนึ่งที่ไม่ปรารถนาให้เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังแต่ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ก็คือ ฉนวนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบเกิดเสื่อมสภาพ หรือการที่สายตัวนำเปลือยสัมผัสกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้ระบบเกิด “การลัดวงจร” หรือ “ฟอลต์” สำหรับสาเหตุของการเกิดฟอลต์ขึ้นกับระบบยังมีอีกหลายสาเหตุ เช่น พายุผ่าลงสายตัวนำ แรงลมพัดให้ตัวนำเปลือยสัมผัสกัน ต้นไม้พาดลงสายตัวนำ รถยนต์ชนเสาไฟฟ้า เป็นต้น ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจแบ่งฟอลต์ ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ฟอลต์แบบสมมาตร (symmetrical fault)
2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (unsymmetrical fault)

ฟอลต์แบบไม่สมมาตรจะกล่าวถึงเนื้อหาโดยละเอียดในบทที่ 7 ส่วนในบทนี้จะกล่าวถึงฟอลต์แบบสมมาตรซึ่งเป็นฟอลต์ 3 เฟสสมมูล และฟอลต์ชนิดนี้มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยที่สุดคือประมาณ 5% ของจำนวนฟอลต์รวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง แต่มีความเป็นไปได้สูงที่จะเป็นฟอลต์รุนแรงที่สุด

สำหรับประโยชน์ของการศึกษาฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะให้ผลและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานดังนี้

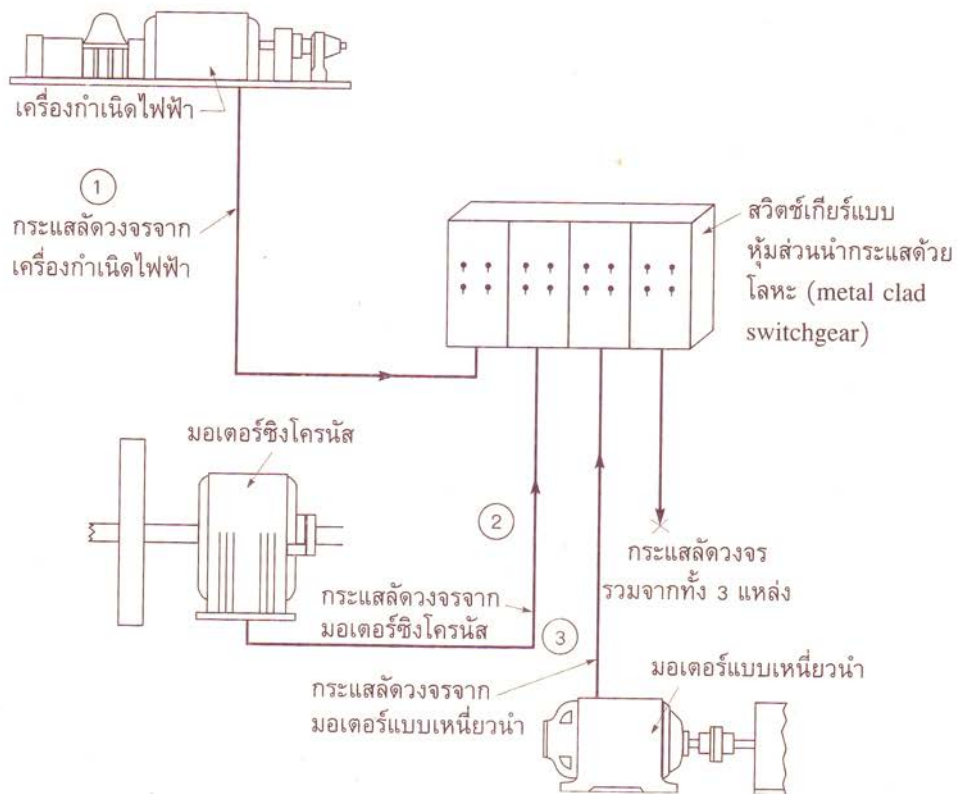
1. ทำให้ทราบระดับของกระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุดที่บัสต่างๆ
2. นำค่าระดับกระแสลัดวงจรไปกำหนดขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์
3. กำหนดรูปแบบของรีเลย์ป้องกัน
4. ทำให้ทราบระดับแรงดันขณะเกิดฟอลต์

5.1 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร (Sources of Short-Circuit Currents)

เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือฟอลต์ขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การหาขนาดของกระแสลัดวงจรเพื่อที่จะได้นำมาพิจารณาเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามการหาขนาดของกระแสลัดวงจรมีความจำเป็นต้องทราบถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรและคุณลักษณะรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรมัน

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่ 3 แหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 คือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
2. มอเตอร์ซิงโครนัสและซิงโครนัสคอนเดนเซอร์
3. มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.1 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มอเตอร์ซิงโครนัส และมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

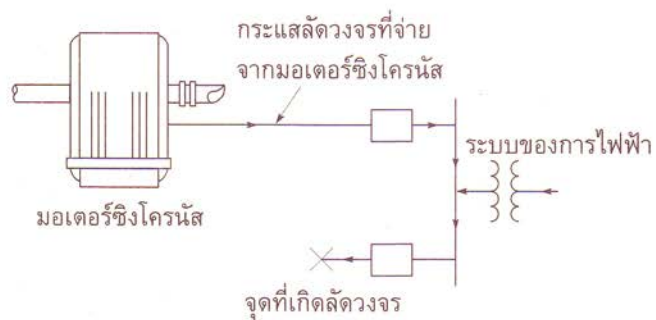
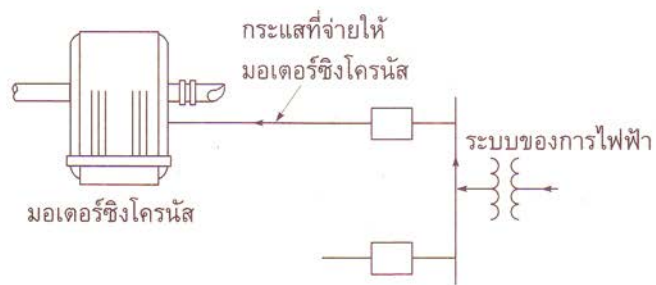
5.1.1 การกำเนิดกระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนได้ด้วยการขับของเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องกังหันน้ำ หรือเครื่องต้นกำลังชนิดอื่นๆ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นกับระบบจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะยังคงผลิตแรงดันและจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ ทั้งนี้เพราะว่าโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงได้รับแรงดันกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น (field excitation) ในขณะเดียวกันเครื่องต้นกำลังก็ยังคงขับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วรอบตามปกติ ซึ่งแรงดันที่ผลิตได้นี้เองจะเป็นสิ่งที่กำเนิดกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดลัดวงจรของระบบ และกระแสลัดวงจรที่ไหลนี้จะถูกจำกัดโดยอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของวงจรระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจุดที่เกิดลัดวงจร สำหรับการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสลัดวงจรจะถูกจำกัดโดยอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเองเท่านั้น

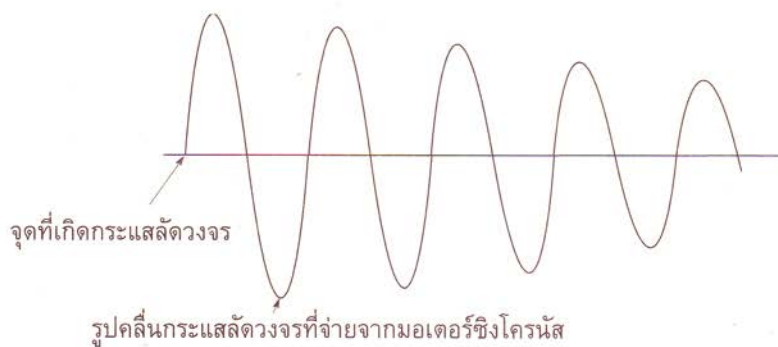
5.1.2 การกำเนิดกระแสลัดวงจรของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสจะมีโครงสร้างเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กล่าวคือจะมีสนามแม่เหล็กกระตุ้นโดยไฟฟ้ากระแสตรง และขดลวดสเตเตอร์ที่มีไฟฟ้ากระแสสลับไหล ปกติมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับกำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล อย่างไรก็ตามการออกแบบมอเตอร์ซิงโครนัสจะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาก ดังนั้นมอเตอร์ซิงโครนัสสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้หากมีเครื่องต้นกำลังมาขับให้หมุน ซึ่งในความเป็นจริงในขณะที่เกิดลัดวงจรขึ้นในระบบมอเตอร์ซิงโครนัสจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจ่ายกระแสลัดวงจรให้กับระบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก)

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นจะมีผลทำให้แรงดันของระบบมีค่าลดลงอย่างมาก จึงทำให้มอเตอร์ซิงโครนัสหยุดการจ่ายพลังงานให้กับโหลดทางกลและเริ่มหมุนช้าลง อย่างไรก็ตามความเฉื่อย (inertia) ของโหลดและโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสเองจะเป็นตัวทำให้มอเตอร์ยังคงหมุนต่อไป หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานจากการหมุนเนื่องจากความเฉื่อยของโหลด และโรเตอร์จะเป็นเครื่องต้นกำลังที่ใช้ขับให้มอเตอร์ซิงโครนัสหมุนและทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะจ่ายกระแสลัดวงจรให้กับจุดลัดวงจรของระบบอยู่หลายไซเคิลของความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข) เป็นรูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่มอเตอร์ซิงโครนัสจ่ายให้กับระบบ โดยขนาดของกระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับแรงม้า พิกัดแรงดัน และรีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ซิงโครนัส และรีแอกแตนซ์ของระบบจากมอเตอร์ซิงโครนัสไปยังจุดที่เกิดลัดวงจร



(ก) มอเตอร์ซิงโครนัสจะรับกระแสจากแหล่งจ่ายของการไฟฟ้า แต่จะเป็นตัวจ่ายกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ



(ข) รูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่จ่ายมาจากมอเตอร์ซิงโครนัส

รูปที่ 5.2 การกำเนิดกระแสลัดวงจรของมอเตอร์ซิงโครนัส

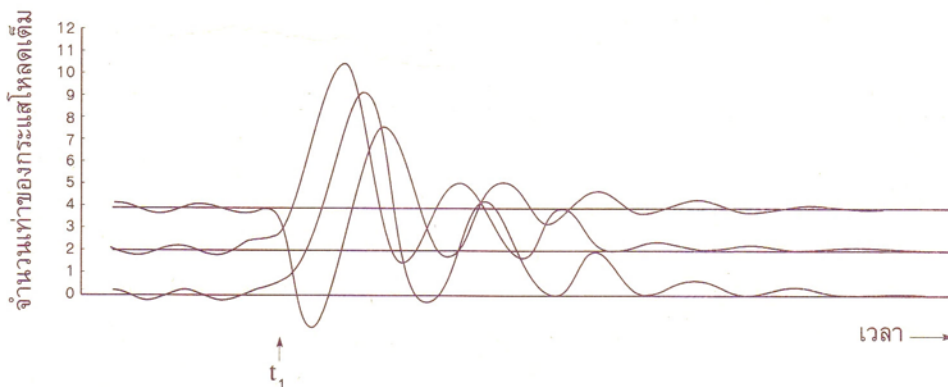


5.1.3 การกำเนิดกระแสลัดวงจรของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบผลจากความเฉื่อยของโหลดและโรเตอร์ของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำจะเหมือนกับมอเตอร์ซิงโครนัส กล่าวคือความเฉื่อยเหล่านี้จะเป็นตัวขั้มมอเตอร์หลังจากเกิดการลัดวงจร แต่มีสิ่งหนึ่งที่แตกต่างกันก็คือ มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำไม่มีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (dc field winding) อย่างไรก็ตามในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำก็จะมีฟลักซ์แม่เหล็กขณะที่มอเตอร์ทำงานตามปกติ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะทำหน้าที่เหมือนกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงในมอเตอร์ซิงโครนัส

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำจากขดลวดสเตเตอร์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ก็ยังคงเกิดขึ้นตลอดตราบเท่าที่ขดลวดสเตเตอร์ได้รับการจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก อย่างไรก็ตามถ้าหากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกันกับการเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบ แต่ฟลักซ์แม่เหล็กในโรเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ไม่สามารถลดลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เดียวกันมอเตอร์ยังคงหมุนด้วยความเฉื่อยของโหลดและโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ และเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรไหลจากมอเตอร์ไปสู่จุดลัดวงจรจนกระทั่งฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ลดลงเป็นศูนย์

รูปที่ 5.3 แสดงรูปคลื่นลัดวงจรจากมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ โดยเริ่มต้นมอเตอร์หมุนแบบโหลดน้อย (light load) จนกระทั่งเวลา t_1 เกิดการลัดวงจรทั้ง 3 เฟสขึ้นในระบบซึ่งเป็นการลัดวงจรขั้วของขดลวดสเตเตอร์เข้าด้วยกัน สำหรับกระแสที่แสดงในรูปที่ 5.3 นี้วัดจากจุดลัดวงจรทางด้านมอเตอร์ ดังนั้นจะไม่ปรากฏกระแสลัดวงจรที่จ่ายมาจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ แต่จะมีเฉพาะกระแสลัดวงจรที่กำเนิดโดยมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่กำเนิดโดยมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำขณะที่หมุนด้วยโหลดน้อย

5.2 รีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน (Rotating-Machine Reactance)

จากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหมุน ซึ่งรูปแบบของรีแอกแตนซ์ไม่ธรรมดาเหมือนกับรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงกำลังหรือเคเบิลของสายส่งพลังไฟฟ้า แต่จะมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยในขั้นตอนของการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์ป้องกันนั้นจะมีรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ 3 ค่าคือ

5.2.1 ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Subtransient Reactance : X_d'')

เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์จะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดลัดวงจรและใช้สำหรับหาค่ากระแสซับทรานเซียนต์ (subtransient current) ในระหว่างไซเคิลแรกๆ ของความถี่กระแสลัดวงจร

5.2.2 ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ (Transient Reactance : X_d')

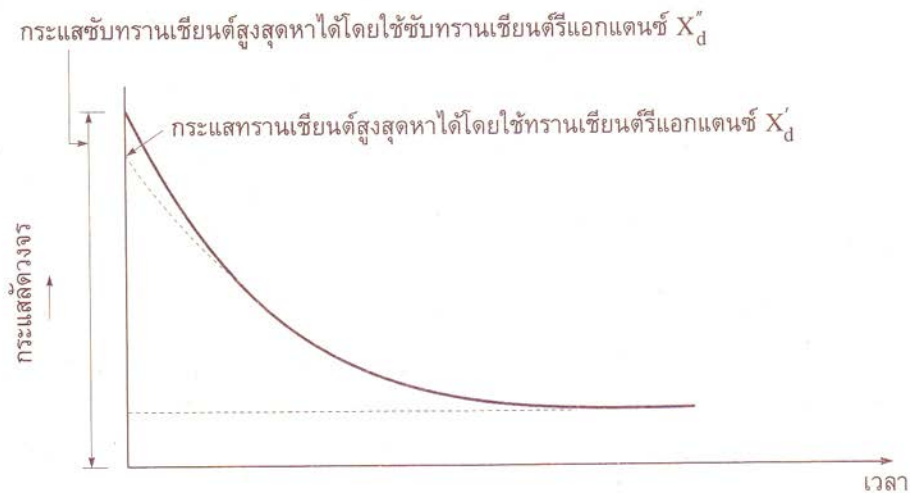
เป็นค่ารีแอกแตนซ์เริ่มต้น (initial reactance) ของขดลวดสเตเตอร์ ใช้สำหรับหากระแสทรานเซียนต์ (transient current) ในช่วงเวลาต่อมาจากซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์จะมีผลถึง 0.5 วินาทีหรือนานกว่าขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

5.2.3 ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (Synchronous Reactance : X_d)

เป็นรีแอกแตนซ์สำหรับใช้หากระแสที่ไหลในสภาวะอยู่ตัว (steady-state) ซึ่งจะมีผลก็ต่อเมื่อเวลาได้ผ่านไปหลายวินาทีหลังจากการเกิดลัดวงจรขึ้น สำหรับค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์จะไม่นำมาใช้เพื่อคำนวณหากระแสลัดวงจรเพื่อไปหาขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์ แต่จะใช้สำหรับการศึกษาเพื่อตั้งค่ารีเลย์ให้ทำงาน (relay-setting)

รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลากับค่ารีแอกแตนซ์ต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นที่แปรไปตามเวลาเช่นกัน





รูปที่ 5.4 กระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แปรตามเวลา

5.3 กระแสลัดวงจรสมมาตรและไม่สมมาตร (Symmetrical and Asymmetrical Short-Circuit Currents)

เทอมของกระแสสมมาตรและไม่สมมาตรจะใช้กับการบอกความสมมาตรของรูปคลื่นกระแสลัดรอบแกนศูนย์ (about the zero axis) ดังนี้

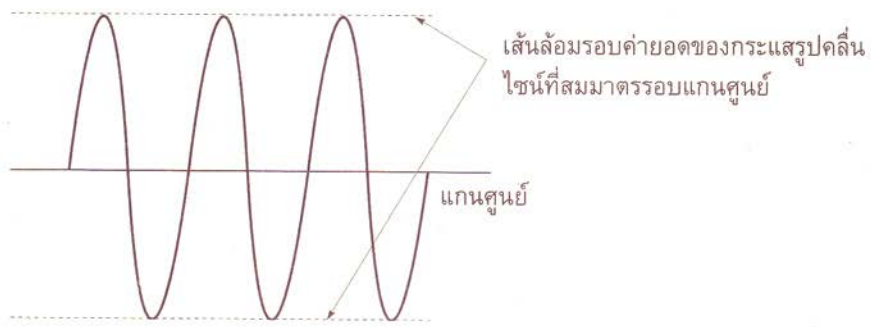
1. กระแสสมมาตร

หมายถึงรูปคลื่นของกระแสที่มีเส้นล้อมรอบ (envelop) ค่ายอดของกระแส (peak current) สมมาตรรอบแกนศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6

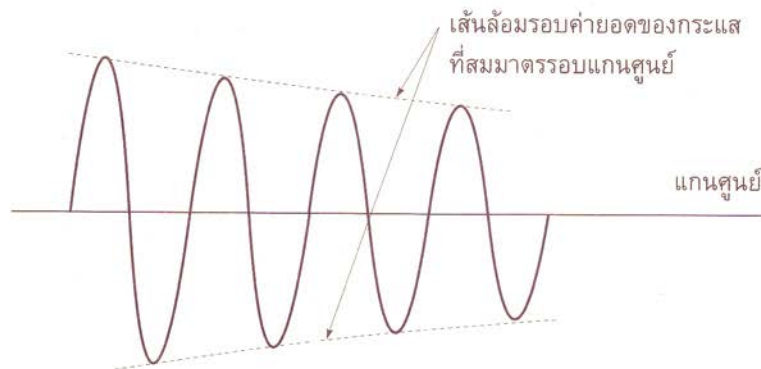
2. กระแสไม่สมมาตร

หมายถึงรูปคลื่นของกระแสที่มีเส้นล้อมรอบค่ายอดของกระแสไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

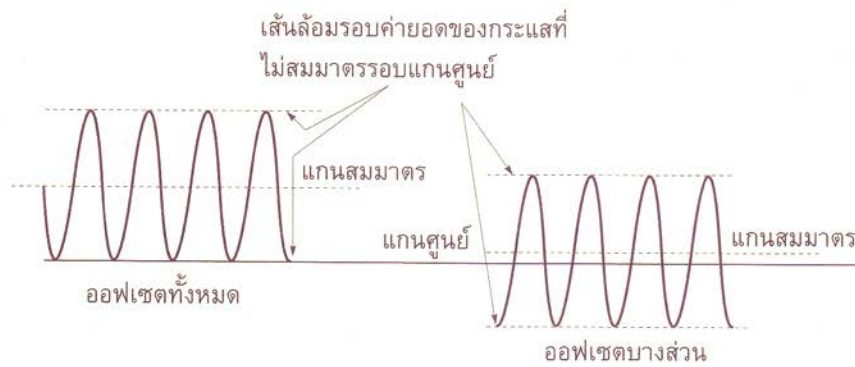
โดยทั่วไปเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบกระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกๆ หลังเกิดลัดวงจรจะไม่สมมาตร ซึ่งจะมีค่าไม่สมมาตรสูงสุดในทันทีที่เกิดลัดวงจร แต่ในช่วงไซเกิลต่อๆ มาหลังเกิดลัดวงจร กระแสจะค่อยๆ กลับสู่สภาพสมมาตร ดังแสดงรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.8



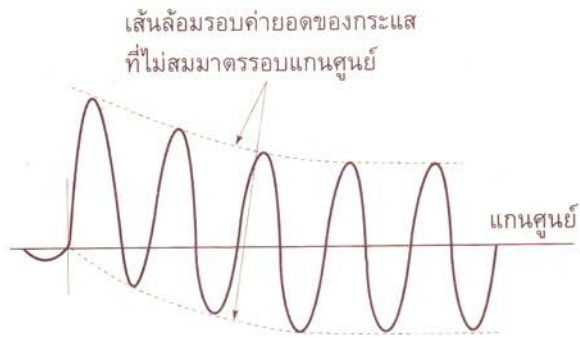
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสสลับที่สมมาตรรอบแกนศูนย์



รูปที่ 5.6 กระแสสลับที่สมมาตรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ลัดวงจร



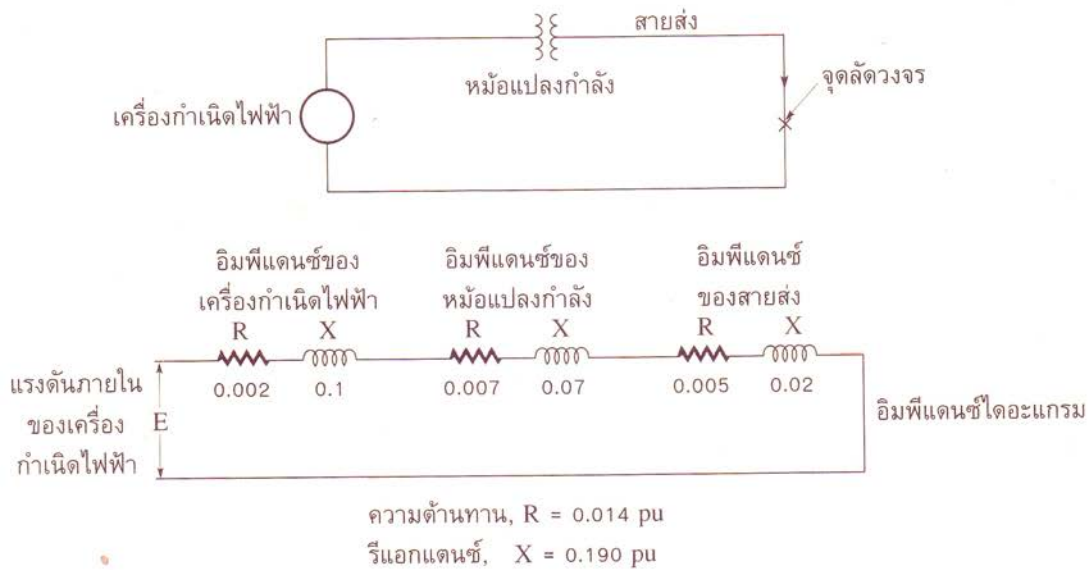
รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสสลับไม่สมมาตรทางทฤษฎีโดยไม่พิจารณาส่วนประกอบกระแสตรง



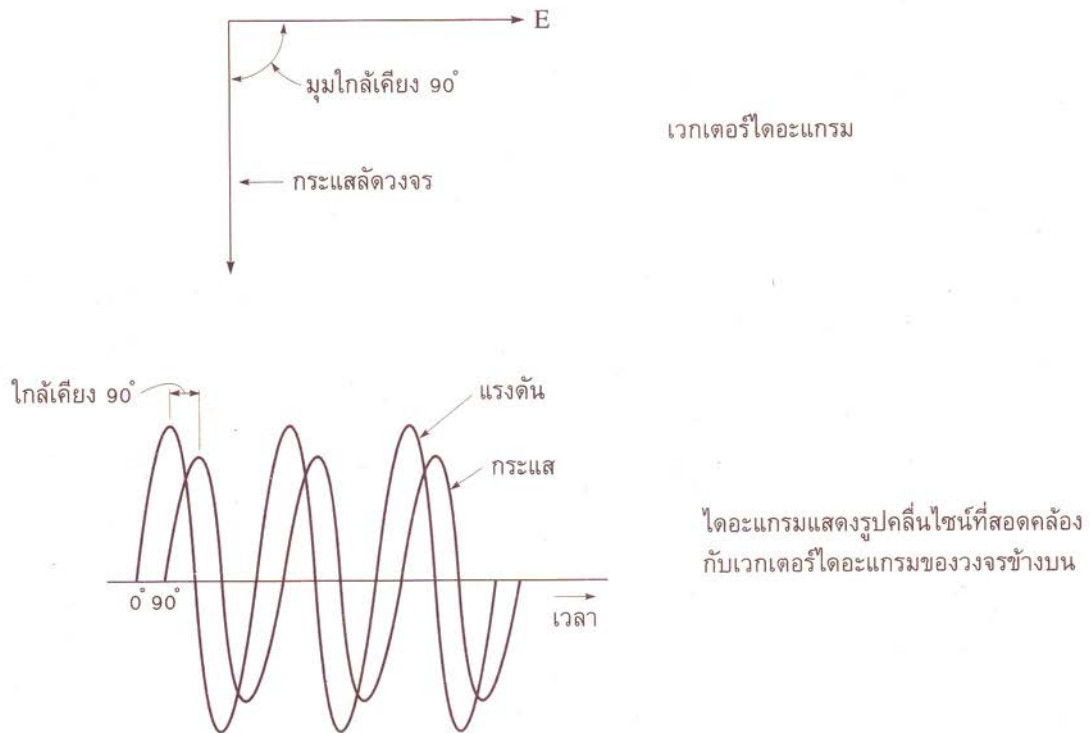
รูปที่ 5.8 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรทั่วไป

5.4 การเกิดกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง (Asymmetrical Short Circuit Current in Power System)

ในระบบไฟฟ้ากำลังการผลิตไฟฟ้าจะมีแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบกระแสลัดวงจรก็จะมีรูปคลื่นไซน์เช่นกัน ดังนั้นเราจึงใช้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นไซน์ในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจร



รูปที่ 5.9 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างแรงดันและกระแสลัดวงจร

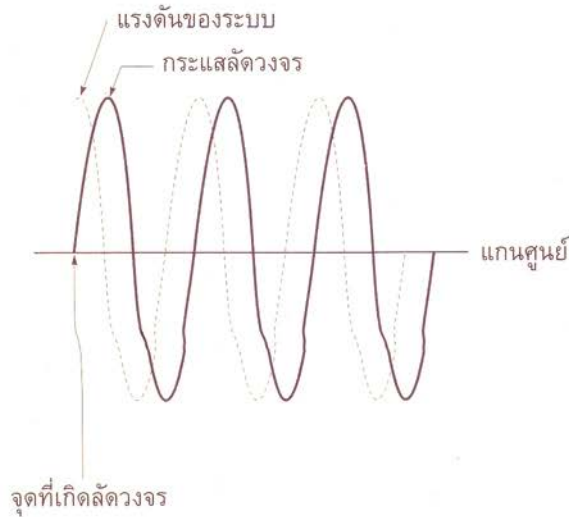


รูปที่ 5.9 (ต่อ) ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างแรงดันและกระแสลัดวงจร

เมื่อพิจารณาวงจรของระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 5.9 ถ้าระบบมีความต้านทานน้อยกว่า $\frac{1}{10}$ เท่าของรีแอกแตนซ์แล้ว เราสามารถที่จะตัดส่วนของความต้านทานออกไปได้ ดังนั้นเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น จึงมีผลทำให้มุมเฟสแอมพลิจูดที่หาได้จากอัตราส่วนของความต้านทานและรีแอกแตนซ์เฉพาะของวงจร (ไม่คิดของโหลด) มีค่าใกล้เคียง 90° ด้วยเหตุนี้กระแสลัดวงจรของวงจรจึงล่าหลังแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 90° (ตามเวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 5.9)

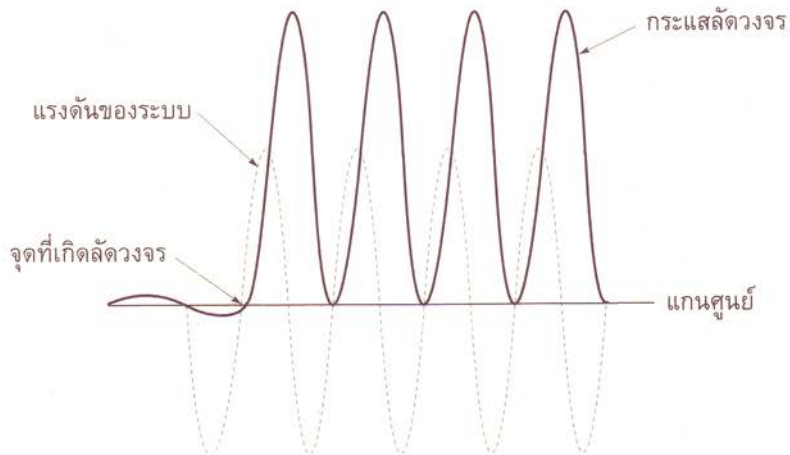
ถ้าวงจรในระบบไฟฟ้ามีรีแอกแตนซ์เป็นหลักและเมื่อเกิดลัดวงจรที่ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ดังนั้นกระแสลัดวงจรจึงเริ่มต้นที่มุมศูนย์และจะมีรูปคลื่นไซน์ที่สมมาตรรอบแกนศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งกระแสลัดวงจรนี้คือ กระแสลัดวงจรสมมาตร (symmetrical short-circuit current)





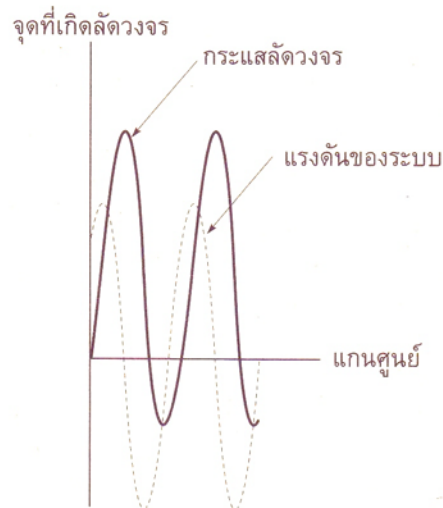
รูปที่ 5.10 กระแสลัดวงจรสมมาตรและแรงดันของระบบที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับศูนย์

ถ้าวงจรของระบบไฟฟ้าเดียวกันเกิดลัดวงจรขึ้นที่จุดศูนย์ของรูปคลื่นแรงดัน กระแสลัดวงจรก็จะเริ่มต้นที่จุดศูนย์เช่นเดียวกัน แต่ไม่สามารถเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมมาตรรอบแกนศูนย์ เพราะถ้าเป็นเช่นนั้นกระแสลัดวงจรก็จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรจะเหมือนกับแรงดันแต่มีมุมเฟสล่าช้าอยู่ 90° ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรสามารถที่จะเกิดขึ้นเพียงรูปแบบเดียวคือ ไม่สมมาตรรอบแกนศูนย์และเป็นรูปคลื่นไซน์ที่ล่าช้าแรงดันเป็นมุม 90° ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กระแสลัดวงจรไม่สมมาตรและแรงดันของระบบที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับศูนย์

ถ้าพิจารณาเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุดใดๆ ของรูปคลื่นแรงดัน ยกเว้นที่ค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน จะมีผลทำให้รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรเกิดการออฟเซต (offset) ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ค่าออฟเซตขึ้นอยู่กับจุดใดบนรูปคลื่นแรงดันที่เกิดลัดวงจร ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงจากออฟเซตเป็นศูนย์ (ตามรูปที่ 5.10) จนถึงออฟเซตสูงสุด (ตามรูปที่ 5.11)



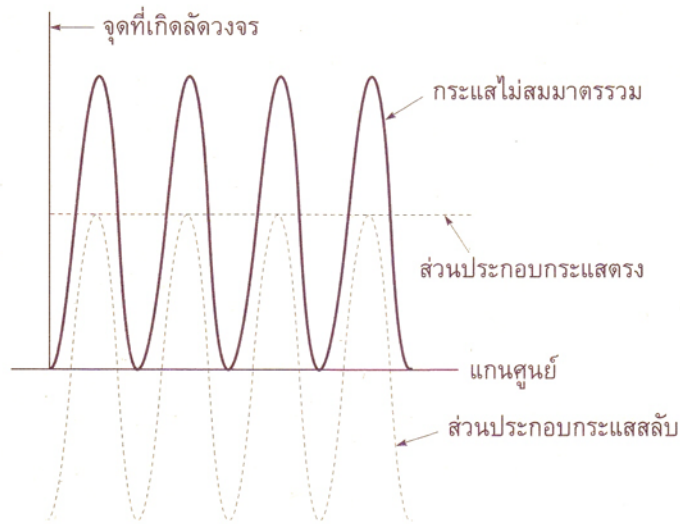
รูปที่ 5.12 กระแสลัดวงจรไม่สมมาตรและแรงดันของระบบที่มีเฟาเวอร์เฟกเตอร์เท่ากับศูนย์ โดยเกิดลัดวงจรขึ้นที่จุดใดๆ ระหว่างจุดศูนย์และค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน

สำหรับกรณีที่วงจรของระบบประกอบทั้งรีแอกแตนซ์และความต้านทานค่าออฟเซตของกระแสลัดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับวงจรที่มีรีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเราจะไปพิจารณาวงจรลักษณะนี้อย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่งในหัวข้อที่ 5.6

5.5 ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรไม่สมมาตร (DC Component of Asymmetrical Short-Circuit Currents)

ในความเป็นจริงพฤติกรรมของกระแสไม่สมมาตรที่ถูกต้อนั้นจะประกอบด้วย กระแส 2 ส่วนไหลไปในเวลาเดียวกัน กล่าวคือส่วนแรกเป็นส่วนประกอบกระแสสลับที่สมมาตร และอีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนประกอบกระแสตรง โดยผลรวมของกระแสทั้งสองส่วนที่เวลาใดๆ จะเท่ากับขนาดของรูปคลื่นกระแสสลับไม่สมมาตรรวมที่เวลาเดียวกัน

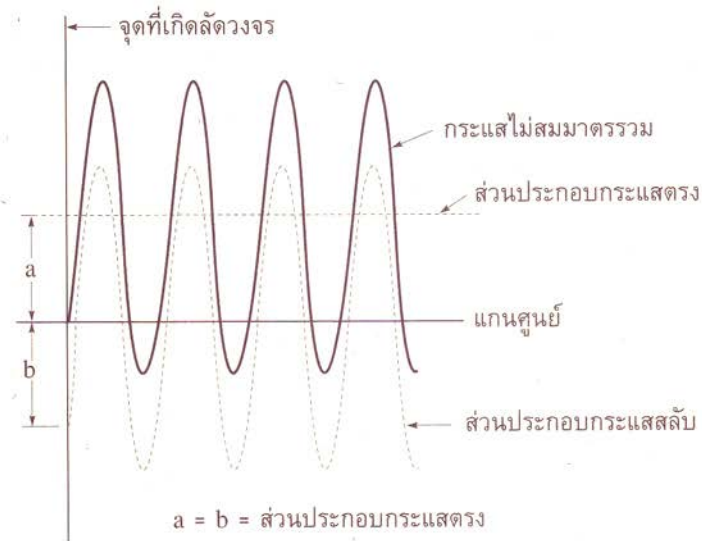
จากรูปที่ 5.11 แสดงกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรซึ่งสามารถแยกออกเป็นกระแสสลับสมมาตร และส่วนประกอบกระแสตรงได้ตามรูปที่ 5.13 ถ้าเรารวมค่าของกระแสทั้งสองส่วนนี้ที่เวลาใดๆ (เส้นประ) ก็จะได้ผลลัพธ์เป็นรูปคลื่นของกระแสไม่สมมาตร อย่างไรก็ตามก็ตามกระแสไม่สมมาตรที่แสดงตามรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.13 เป็นรูปคลื่นที่แสดงให้เห็นเพื่อทำความเข้าใจทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียว ซึ่งวงจรในทางปฏิบัตินั้นส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลง (decays) อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.13 ส่วนประกอบของกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรทางทฤษฎี สำหรับวงจรทางปฏิบัติส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงเป็นศูนย์ในไซเคิลต่อ ๆ มา

5.5.1 ขนาดเริ่มต้นของส่วนประกอบกระแสตรง (Initial Magnitude of DC Component)

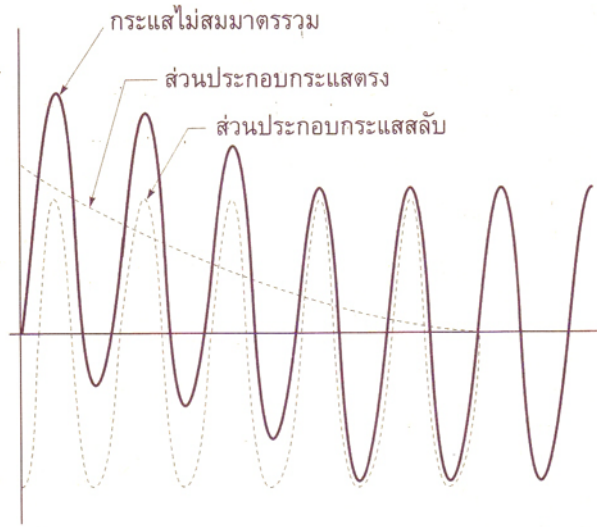
ขนาดของส่วนประกอบกระแสตรงขึ้นอยู่กับจุดที่เกิดลัดวงจร และอาจเปลี่ยนแปลงจากค่าศูนย์ตามรูปที่ 5.10 ไปจนถึงค่าเริ่มต้นสูงสุดซึ่งเท่ากับค่ายอดของส่วนประกอบกระแสสลับที่สมมาตรตามรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.13 เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ขนาดเริ่มต้นของส่วนประกอบกระแสตรงจะมีค่าเท่ากับค่าของส่วนประกอบกระแสสลับสมมาตรที่จุดเกิดลัดวงจรนั้น และในความเป็นจริงเมื่อเวลาผ่านไปขนาดของส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงจะไม่ไหลคงที่อย่างต่อเนื่องเหมือนกับรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 นอกเสียจากวงจรนั้นมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์



รูปที่ 5.14 ส่วนประกอบของกระแสตรงไม่สมมาตร เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุดใดจุดหนึ่งระหว่างจุดศูนย์ และจุดยอดของรูปคลื่นแรงดันของระบบซึ่งเป็นการแสดงทางทฤษฎีเท่านั้น

5.5.2 การลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง (Decrement of DC Component)

ปกติในระบบไฟฟ้ากำลังจะไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับการไหลของกระแสตรง ด้วยเหตุนี้พลังงานในรูปของส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสที่ไหลจะเป็นกำลังสูญเสีย I^2R โดยผ่านทางความต้านทานของวงจร และถ้าวงจรมีความต้านทานเป็นศูนย์กระแสตรงก็จะไหลด้วยค่าคงที่ (ตามรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14) จนกระทั่งตัดตอนวงจรนี้ออกจากระบบ อย่างไรก็ตาม วงจรในทางปฏิบัติทั้งหมดต้องมีค่าความต้านทานอยู่บ้าง ดังนั้นส่วนประกอบกระแสตรงก็จะลดลงไปตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 5.15 และการรวมกันของส่วนประกอบกระแสตรงที่ลดลง และส่วนประกอบกระแสสลับสมมาตรจะทำให้รูปคลื่นกระแสไม่สมมาตรเปลี่ยนเป็นรูปคลื่นสมมาตร เมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป อัตราการลดลงของกระแสนี้เรียกว่า การลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง



รูปที่ 5.15 รูปคลื่นการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและกระแสลัดวงจรไม่สมมาตรจะมีรูปคลื่นเป็นสมมาตรเมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป

5.5.3 อัตราส่วน X/R (X/R Ratio)

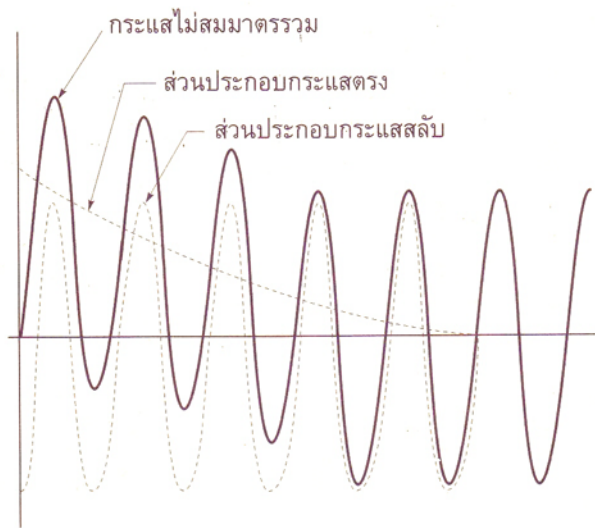
อัตราส่วน X/R คืออัตราส่วนระหว่างรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจร การลดลงหรืออัตราการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วน X/R ของวงจร ซึ่งในทางทฤษฎีไฟฟ้าเหมือนกับการเปิดวงจรอนุกรมระหว่างแบตเตอรี่และอินดักทีฟโหลด

ถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นอนันต์ (ความต้านทานเป็นศูนย์) จะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงจะไม่ลดลงเลยดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นศูนย์ (วงจรเป็นความต้านทานทั้งหมดไม่มีรีแอกแตนซ์) ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงทันที สำหรับที่อัตราส่วน X/R ใดๆ ระหว่างขีดจำกัดทั้งสอง ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงไปตามเวลาจนเป็นศูนย์ในที่สุดตามรูปที่ 5.15

5.5.4 เวลาคงที่ของกระแสตรง (DC Time Constant)

จากอัตราการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะมีส่วนของเวลาคงที่ ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการสำหรับการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงประมาณ 37% ของค่าเริ่มต้น เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น เวลาคงที่นี้คืออัตราส่วนของอินดักแตนซ์มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์มของวงจรหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือสามารถกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นเวลาสำหรับส่วนประกอบกระแสตรงลดลงจนเป็นศูนย์ ถ้ามันยังคงลดลงด้วยอัตราเดียวกันกับอัตราการลดลงของค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่

5.16



รูปที่ 5.15 รูปคลื่นการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและกระแสสลับวงจรไม่สมมาตรจะมีรูปคลื่นเป็นสมมาตรเมื่อส่วนประกอบกระแสตรงหมดไป

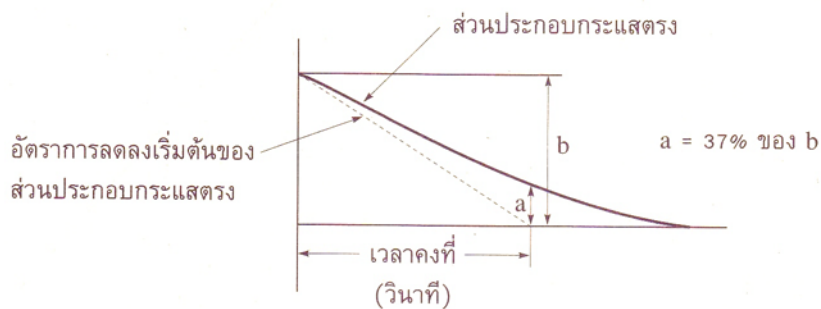
5.5.3 อัตราส่วน X/R (X/R Ratio)

อัตราส่วน X/R คืออัตราส่วนระหว่างรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจร การลดลงหรืออัตราการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วน X/R ของวงจร ซึ่งในทางทฤษฎีไฟฟ้าเหมือนกับการเปิดวงจรอนุกรมระหว่างแบตเตอรี่และอินดักทีฟโหลด

ถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นอนันต์ (ความต้านทานเป็นศูนย์) จะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงจะไม่ลดลงเลยดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นศูนย์ (วงจรเป็นความต้านทานทั้งหมดไม่มีรีแอกแตนซ์) ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงทันที สำหรับที่อัตราส่วน X/R ใดๆ ระหว่างขีดจำกัดทั้งสอง ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงไปตามเวลาจนเป็นศูนย์ในที่สุดตามรูปที่ 5.15

5.5.4 เวลาคงที่ของกระแสตรง (DC Time Constant)

จากอัตราการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะมีส่วนของเวลาคงที่ ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการสำหรับการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงประมาณ 37% ของค่าเริ่มต้น เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น เวลาคงที่นี้คืออัตราส่วนของอินดักแตนซ์มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์มของวงจรหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือสามารถกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นเวลาสำหรับส่วนประกอบกระแสตรงลดลงจนเป็นศูนย์ ถ้ามันยังคงลดลงด้วยอัตราเดียวกันกับอัตราการลดลงของค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 เวลาคงที่สำหรับการลดลงของกระแสตรง

5.5.6 ค่าประสิทธิผลที่รวมส่วนประกอบกระแสตรง (RMS Value Including DC Component)

ค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นกระแสสลับจะมีความสำคัญต่อการกำหนดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ และมอเตอร์สตาร์ทเตอร์ในเทอมของกระแสประสิทธิผลหรือเควีเอสเอ็มแอล (Equivalent kVA) ค่าประสิทธิผลสูงสุดของกระแสสลับวงจรจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 1 ไซเคิลหลังเกิดลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ถ้าไม่มีการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงตามรูปที่ 5.13 ค่าประสิทธิผลในไซเคิลแรกของกระแสจะมีค่า 1.732 เท่าของค่าประสิทธิผลส่วนประกอบกระแสสลับแต่่วงจรในทางปฏิบัติจะมีการลดลงของกระแสตรงในช่วงไซเคิลแรกเสมอ

สำหรับค่าประสิทธิผลโดยประมาณของรูปคลื่นออฟเซต 1 ไซเคิล ไม่ว่าจะ เป็นออฟเซตบางส่วนหรือออฟเซตทั้งหมดคือ

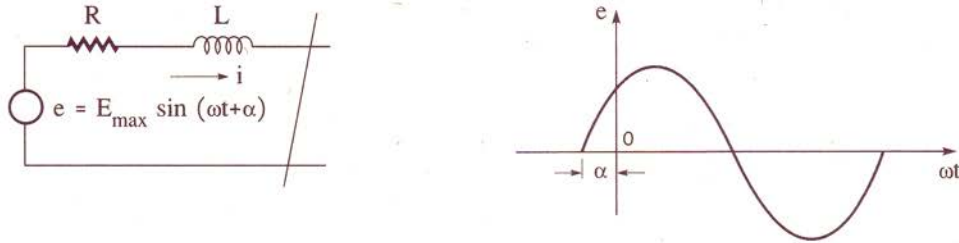
$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

เมื่อ C คือ ค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นออฟเซตหรือกระแสไม่สมมาตรมากกว่า 1 ไซเคิล

a คือ ค่าประสิทธิผลของส่วนประกอบกระแสสลับ

b คือ ค่าของส่วนประกอบกระแสตรงที่ไซเคิลครึ่ง

5.6 สภาวะทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ 3 เฟส (Generator Transients During a Three-Phase Fault)



รูปที่ 5.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ต่อเฟส) ที่เกิดฟอลต์แบบสมมูล โดยสมมติให้อินดักแตนซ์มีค่าคงที่

จากรูปที่ 5.17 สมมติให้เกิดฟอลต์แบบสมมูลขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เวลา $t = 0$ ดังนั้นสมการของแรงดันชั่วขณะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} Ri + L \frac{di}{dt} &= E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ &= E_m (\sin \omega t \cos \alpha + \sin \alpha \cos \omega t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

สำหรับการแก้ปัญหาของสมการที่ (5.1) ซึ่งเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่อยู่ในโดเมนเวลา (time domain) สามารถทำได้โดยวิธีการแปลงลาปลาซให้เป็นสมการพีชคณิตในโดเมนความถี่เชิงซ้อน (complex frequency domain) ดังนี้

$$\begin{aligned} I(s)(R + Ls) &= E_m \left[\cos \alpha \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) + \sin \alpha \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) \right] \\ I(s) &= E_m \left[\frac{s(\sin \alpha) + \omega(\cos \alpha)}{(s^2 + \omega^2)(R + Ls)} \right] \\ I(s) &= \frac{E_m}{L} \left[\frac{As + B}{s^2 + \omega^2} + \frac{C}{s + R/L} \right] \end{aligned} \quad (5.2)$$

สมการที่ (5.2) เป็นสมการลาปลาซที่อยู่ในรูปแบบของเศษส่วนย่อย (partial-fraction form) เพื่อความสะดวกเราจะอินเวิร์สสมการนี้กลับให้อยู่ในโดเมนเวลาได้โดยการใช้ตารางลาปลาซ สำหรับค่าคงที่ A , B และ C มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} A &= \frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta), \quad B = \frac{\omega L}{Z} \cos(\alpha - \theta) \quad \text{และ} \quad C = -\frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta) \\ \text{เมื่อ} \quad Z &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \text{และ} \quad \theta = \arctan \frac{\omega L}{R} \end{aligned}$$

แทนค่า A, B และ C ลงในสมการที่ (5.2) จะได้

$$I(s) = \frac{E_m}{L} \left[\frac{s \frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta)}{s^2 + \omega^2} + \frac{\omega L}{Z} \frac{\cos(\alpha - \theta)}{s^2 + \omega^2} - \frac{\frac{L}{Z} \sin(\alpha - \theta)}{s + R/L} \right]$$

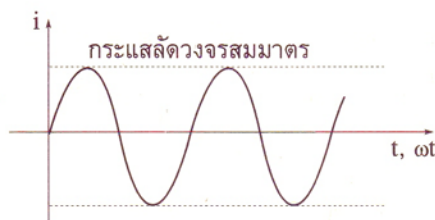
$$= \frac{E_m}{Z} \left[\sin(\alpha - \theta) \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) + \cos(\alpha - \theta) \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) - \frac{\sin(\alpha - \theta)}{s + R/L} \right]$$

จากการอินเวิร์สการแปลงลาปลาซจะได้สมการกระแสในโดเมนเวลาดังนี้

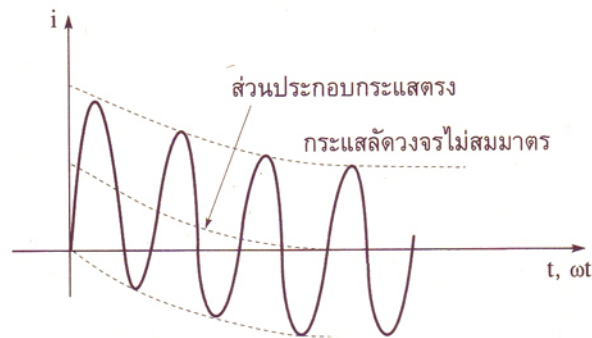
$$i(t) = \frac{E_m}{Z} \left[\sin(\alpha - \theta) \cos \omega t + \cos(\alpha - \theta) \sin \omega t - \sin(\alpha - \theta) e^{-Rt/L} \right]$$

$$= \frac{E_m}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-Rt/L} \right] \quad (5.3)$$

จะเห็นได้ว่าการแสดทรานเซียนต์ขึ้นอยู่กับมุม α ของรูปคลื่นแรงดันในขณะที่เกิดลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ โดยเทอมแรกของสมการที่ (5.3) จะแปรไปตามเวลาด้วยฟังก์ชันไซน์ซอชอยด์ ซึ่งเป็นเทอมของกระแสอยู่ตัว (steady-state current) หรือกระแสสลับสมมาตรนั่นเอง ส่วนเทอมที่สองเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นคาบ (nonperiodic) และมีค่าลดลงในลักษณะของเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ด้วยเวลาคงที่ของ L/R ซึ่งเราทราบมาก่อนหน้านี้แล้วว่าเป็นเทอมของส่วนประกอบกระแสตรง และเรายังทราบอีกว่าจะไม่เกิดส่วนประกอบกระแสตรงขึ้น “ถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดของรูปคลื่นแรงดันแล้วทำให้มุม $(\alpha - \theta) = 0^\circ$ หรือ $(\alpha - \theta) = 180^\circ$ ดังรูปที่ 5.18 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสตามเวลาที่สอดคล้องกับสมการที่ (5.3) เมื่อ $(\alpha - \theta) = 0^\circ$ จึงทำให้กระแสลัดวงจรที่จุดนี้เป็นกระแสลัดวงจรที่สมมาตร และถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดของรูปคลื่นแรงดันแล้วทำให้มุม $(\alpha - \theta) = \pm 90^\circ$ จะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงมีค่าสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของส่วนประกอบไซน์ซอชอยด์” ดังรูปที่ 5.19 แสดงกระแสเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อ $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ ส่วนประกอบกระแสตรงอาจมีค่าใดๆ ก็ได้ที่อยู่ระหว่างศูนย์ถึงค่าสูงสุดเท่ากับ E_{\max}/Z ขึ้นอยู่กับเกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุดใดบนรูปคลื่นแรงดันและค่าเฟาเวอร์แพกเตอร์ของวงจร



รูปที่ 5.18 รูปคลื่นของกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ สำหรับมุม $(\alpha - \theta) = 0$ เมื่อ $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ และมีแรงดัน $E_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$



รูปที่ 5.19 รูปคลื่นของกระแสเกิดการลัดวงจรที่เวลา $t = 0$ สำหรับมุม $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ เมื่อ $\theta = \tan^{-1} (\omega L/R)$ และมีแรงดัน $E_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$

จากรูปคลื่นของกระแสในรูปที่ 5.19 เป็นกระแสลัดวงจรไม่สมมาตร ถ้าสมมติให้อินдукแตนซ์ L ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่ ซึ่งทางปฏิบัติจะไม่เป็นจริงอย่างที่สมมตินี้ อย่างไรก็ตาม การตั้งสมมติฐานนี้เพื่อต้องการที่จะนำมาพิจารณาส่วนประกอบกระแสตรงที่มีผลต่อการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยผลของส่วนประกอบกระแสตรงทำให้ต้องเพิ่มขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยการคูณขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่คำนวณมาได้กับแฟกเตอร์การคูณ (multiplying factor) แฟกเตอร์การคูณนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.6 ขึ้นอยู่กับชนิดและความเร็วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้งาน ดังมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.10

5.7 กระแสลัดวงจรและรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Short-Circuit Currents and The Reactance of Synchronous Generators)

จากบทที่ 1 เราได้ศึกษารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เรียกว่า ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ X_s ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์นี้เป็นการรวมกันระหว่างผลของรีแอกแตนซ์รั่ว X_L และรีแอกแตนซ์เนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ X_{AR} นอกจากนี้สำหรับเครื่องจักรกลชนิดโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient-pole machine) X_s อาจจะถูกแทนด้วยซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง X_d ซึ่งผู้อ่านสามารถทบทวนเรื่องของรีแอกแตนซ์เหล่านี้ได้ในหัวข้อที่ 1.2

ค. กระแสขั้วทรานเซียนต์ที่จุดเกิดฟอลต์คือ กระแสฟอลต์ที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ดังนี้

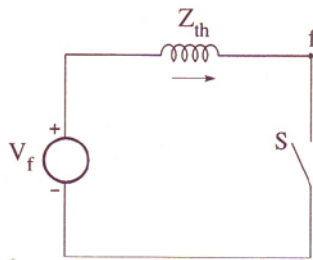
$$\begin{aligned} I_f'' &= I_G'' + I_m'' = 0.69 - j2.71 - 0.69 - j5.37 \\ &= -j8.08 \text{ pu} \end{aligned}$$

ค่าจริงของกระแสฟอลต์ $I_f'' = -j8.08 \times 1312 = -j10,600 \text{ A}$ ตอบ

สำหรับรูปที่ 10.25 (ข) แสดงกระแสฟอลต์ในส่วนต่างๆ คือ I_G'' , I_m'' , และ I_f''

5.8.2 การหากระแสฟอลต์ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 5.24 (ข) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเทวินินได้ตามรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 วงจรสมมูลเทวินินของวงจรรูปที่ 5.24 (ข)

เมื่อ Z_{th} คือ อิมพีแดนซ์สมมูลเทวินิน

โดย

$$Z_{th} = \frac{(Z_{ext} + jX_d'') Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} \quad (5.11)$$

เมื่อเกิดฟอลต์สมมาตร 3 เฟสขึ้นที่จุด f โดยการจำลองด้วยการปิดสวิตช์ S สามารถหากระแสขั้วทรานเซียนต์ที่จุดเกิดฟอลต์ได้จากสมการ

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{th}} = \frac{V_f (Z_L + Z_{ext} + jX_d'')}{Z_L (Z_{ext} + jX_d'')} \quad (5.12)$$

เมื่อหาค่ากระแส I_f'' ได้แล้วสามารถหาค่าของแต่ละส่วนของวงจรได้ด้วยกฎการแบ่งกระแสดังนี้

$$I_{fG}'' = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} I_f'' \quad (5.13)$$

$$I_{fL}'' = \frac{(Z_{ext} + jX_d'')}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} I_f'' \quad (5.14)$$

เมื่อ I_f'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์รวมที่จุดเกิดฟอลต์
 I_{fG}'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 I_{fL}'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของโหลด

สำหรับกระแสขั้วทรานเซียนต์ I_{fG}'' และ I_{fL}'' จะเป็นค่าของกระแสฟอลต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ยังไม่ได้รวมค่ากระแสของโหลดก่อนเกิดฟอลต์ ดังนั้นกระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนต่างๆ ของวงจรเมื่อรวมค่ากระแสโหลดที่ไหลในวงจรก่อนเกิดฟอลต์ สามารถหาได้จากสมการ

$$I_G'' = I_{fG}'' + I_L \quad (5.15)$$

$$I_L'' = I_{fL}'' - I_L \quad (5.16)$$

เมื่อ I_G'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 I_L'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์ในส่วนของโหลด

ตัวอย่างที่ 5.4 จากตัวอย่างที่ 5.3 จงแก้ปัญหาการหากระแสขั้วทรานเซียนต์ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน

วิธีทำ

จากตัวอย่างที่ 5.3 $V_f = 0.97 \angle 0^\circ$ pu

$$I_L = 0.69 + j0.52 \text{ pu}$$

อิมพีแดนซ์เทวินิน $Z_{th} = \frac{(j0.2 + j0.1) \times j0.2}{j0.2 + j0.1 + j0.2} = j0.12 \text{ pu}$

กระแสขั้วทรานเซียนต์รวม $I_f'' = \frac{V_f}{Z_{th}}$
 $= \frac{0.97 + j0}{j0.12} = -j8.08 \text{ pu}$

กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$I''_{fG} = \frac{-j8.08 \times j0.2}{j0.2 + j0.1 + j0.2} = -j3.23 \text{ pu}$$

กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของมอเตอร์

$$I''_{fm} = \frac{-j8.08 \times (j0.2 + j0.1)}{j0.2 + j0.1 + j0.2} = -j4.85 \text{ pu}$$

กระแสขั้วทรานเซียนต์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned} I''_G &= I''_{fG} + I_L \\ &= -j3.23 + 0.69 + j0.52 \\ &= 0.69 - j2.71 \text{ pu} \end{aligned}$$

กระแสขั้วทรานเซียนต์ในมอเตอร์

$$\begin{aligned} I''_m &= I''_{fL} - I_L \\ &= -j4.85 - (0.69 + j0.52) \\ &= -0.69 - j5.37 \text{ pu} \end{aligned}$$

เมื่อเกิดฟอลต์สมมาตร 3 เฟสที่จุด f

ก. กระแสขั้วทรานเซียนต์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} I''_G &= 1312 (0.69 - j2.71) \\ &= 905 - j3550 \text{ A} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

ข. กระแสขั้วทรานเซียนต์ในมอเตอร์คือ

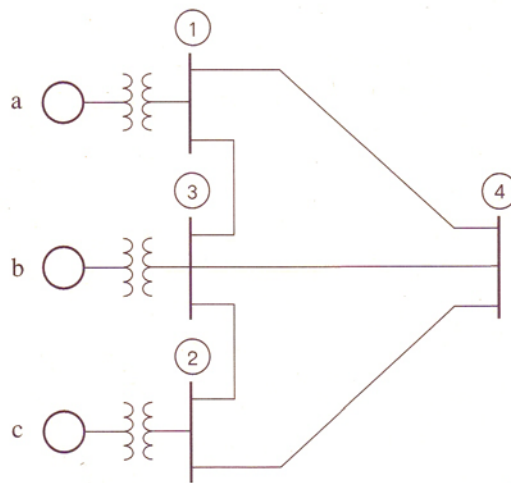
$$\begin{aligned} I''_m &= 1312 (-0.69 - j5.37) \\ &= -905 - j7050 \text{ A} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

ค. กระแสขั้วทรานเซียนต์รวมที่จุด f คือ

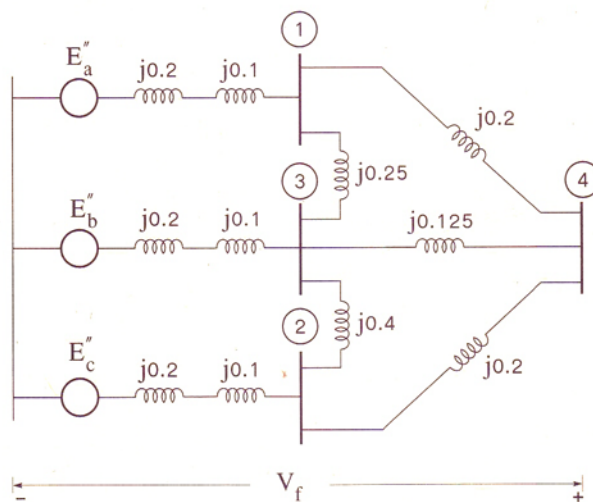
$$\begin{aligned} I''_f &= 1312 (-j8.08) \\ &= -j10,600 \text{ A} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

5.9 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Fault Calculation by The Bus Impedance Matrix)

โดยทั่วไปการศึกษาฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้วิธีการของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z_{bus}) มาแก้ปัญหาเพื่อหากระแสฟอลต์ จากระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 5.27 เมื่อเราแทนค่าชั้บทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์และแรงดันชั้บทรานเซียนต์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้เป็นวงจรตามรูปที่ 5.28 ซึ่งวงจรไฟฟ้านี้จะเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟส (single-phase equivalent circuit) ของระบบ 3 เฟส

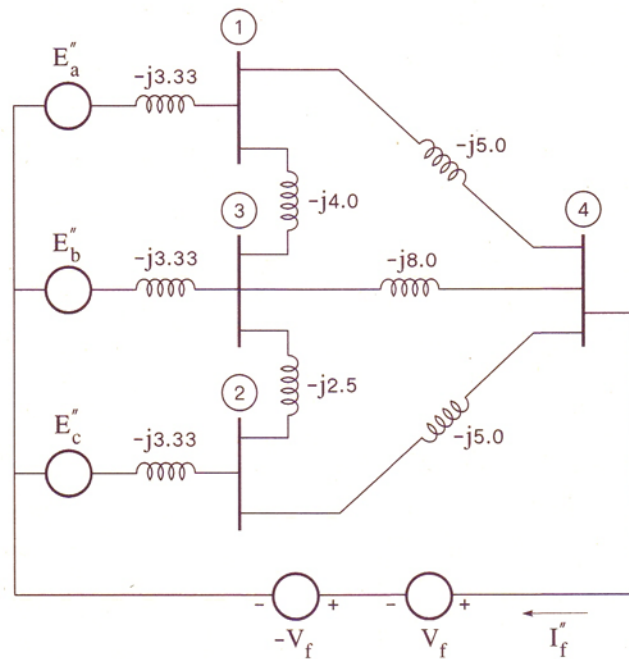


รูปที่ 5.27 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.28 วงจรไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 5.27 ที่แสดงชั้บทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์เป็นค่าเปอร์ยูนิต

ในการศึกษานี้จะเลือกให้เกิดฟอลต์ที่บัส 4 ซึ่งเราสามารถดำเนินขั้นตอนตามหัวข้อที่ 5.8 โดยให้แรงดันก่อนเกิดฟอลต์ที่บัส 4 คือ V_f การเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุล ที่บัส 4 จะจำลองโดยวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 5.29 ด้วยการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต ตามรูปที่ 5.28 ให้เป็นค่าแอดมิตแตนซ์เปอร์ยูนิต ส่วนเหตุที่นำ V_f และ $-V_f$ มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ เสมือนว่าเป็นการลัดวงจรจึงทำให้มีกระแสฟอลต์ซบทรานเซียนต์ I_f'' ไหล



รูปที่ 5.29 วงจรไฟฟ้าของรูปที่ 5.28 ที่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตเป็นแอดมิตแตนซ์เปอร์ยูนิต และเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุล ที่บัส 4 ของระบบซึ่งจำลองโดยการต่อ V_f อนุกรมกับ $-V_f$

จากรูปที่ 5.29 ถ้าทำการลัดวงจรแหล่งจ่าย E_a'' , E_b'' , E_c'' และ V_f ดังนั้นจะเหลือแหล่งจ่าย $-V_f$ เพียงแหล่งเดียวที่จะจ่ายกระแส $-I_f''$ ไหลเข้าบัสที่ 4 (ปกติ I_f'' ไหลออกจากบัสที่ 4) โดยการใช้วิธีการตรวจพินิจสามารถเขียนสมการโหนดสำหรับวงจรไฟฟ้าที่มี $-V_f$ เพียงแหล่งจ่ายเดียวให้อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -12.33 & 0.0 & 4.0 & 5.0 \\ 0.0 & -10.83 & 2.5 & 5.0 \\ 4.0 & 2.5 & -17.83 & 8.0 \\ 5.0 & 5.0 & 8.0 & -18.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ V_2^\Delta \\ V_3^\Delta \\ -V_f \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

เมื่อตัวยก Δ (superscript Δ) เป็นสิ่งที่ใช้บอกว่าแรงดันที่บัสจะมีผลกระทบ เนื่องจากแรงดัน $-V_f$ เพียงอย่างเดียวและที่เลือกเครื่องหมาย Δ เพื่อแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเนื่องมาจากฟอลต์ จากสมการที่ (5.17) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการทั่วไปคือ

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}$$

เมื่อทำการอินเวิร์สแมทริกซ์ \mathbf{Y}_{bus} ของสมการที่ (5.17) จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ และแรงดันที่บัสเนื่องจากแรงดัน $-V_f$ คือ

$$\begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ V_2^\Delta \\ V_3^\Delta \\ -V_f \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{bus} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

ดังนั้น

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{44}} \quad (5.19)$$

และ

$$V_1^\Delta = -I_f'' Z_{14} = -\frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_f \quad (5.20)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_2^\Delta = -\frac{Z_{24}}{Z_{44}} V_f \quad (5.21)$$

$$V_3^\Delta = -\frac{Z_{34}}{Z_{44}} V_f \quad (5.22)$$

เมื่อทำการลัดวงจรแหล่งจ่าย $-V_f$ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 5.29 จะปรากฏแรงดันของแหล่งจ่าย E_a'', E_b'', E_c'' และ V_f ทำให้มีแรงดันและกระแสในทุกส่วนของวงจรก่อนเกิดฟอลต์ โดยหลักการวางซ้อน (superposition) จะมีการเพิ่มแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ด้วยแรงดันตามสมการที่ (5.20) ถึง (5.22) ทำให้สามารถหาแรงดันหลังจากการเกิดฟอลต์ได้ ซึ่งโดยปกติจะสมมติให้วงจรไฟฟ้าไม่มี

โหลด จึงไม่มีกระแสไหลก่อนเกิดฟอลต์ และแรงดันทั้งหมดของวงจรไฟฟ้านี้จะเหมือนกันหมดและมีค่าเท่ากับ V_f ด้วยสมมติฐานดังกล่าวนี้ทำให้สามารถพิจารณาและประยุกต์หลักการวางซ้อนของวงจรไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันหลังเกิดฟอลต์ (postfault voltage) ที่บัสต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_1 &= V_f + V_1^\Delta = V_f - I_f'' Z_{14} \\ V_2 &= V_f + V_2^\Delta = V_f - I_f'' Z_{24} \\ V_3 &= V_f + V_3^\Delta = V_f - I_f'' Z_{34} \\ V_4 &= V_f - V_f = 0 \end{aligned} \quad (5.23)$$

ถ้าไม่พิจารณากระแสก่อนเกิดฟอลต์ สมการทั่วไปที่ใช้สำหรับหากระแสเมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส k คือ

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}} \quad (5.24)$$

และแรงดันหลังเกิดฟอลต์ที่บัส n คือ

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \quad (5.25)$$

ถ้าเราใช้ค่าตัวเลขของสมการที่ (5.17) และทำการอินเวิร์สเมทริกซ์ Y_{bus} ของสมการนี้ จะได้ Z_{bus} ดังนี้

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.1488 & 0.0651 & 0.0864 & 0.0978 \\ 0.0651 & 0.1554 & 0.0799 & 0.0967 \\ 0.0864 & 0.0798 & 0.1341 & 0.1058 \\ 0.0978 & 0.0967 & 0.1058 & 0.1566 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

ตามปกติแรงดัน V_f จะให้มีค่าเท่ากับ $1.0 \angle 0^\circ$ pu ดังนั้นเราสามารถหากระแสและแรงดันตามที่ได้จำลองให้เกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุลขึ้นที่บัส 4 ดังนี้

$$\begin{aligned} I_f'' &= \frac{V_f}{Z_{44}} = \frac{1.0}{j0.1566} = -j6.386 \text{ pu} \\ V_1 &= V_f - \frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.0978}{j0.1566} = 0.3755 \text{ pu} \\ V_2 &= V_f - \frac{Z_{24}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.0967}{j0.1566} = 0.3825 \text{ pu} \\ V_3 &= V_f - \frac{Z_{34}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.1058}{j0.1566} = 0.3244 \text{ pu} \end{aligned}$$

กระแสที่ไหลในส่วนต่างๆ ของระบบสามารถหาได้จากแรงดันและอิมพีแดนซ์ เช่น กระแสฟอลต์ที่ไหลในบรานช์ที่ต่อระหว่างบัส 1 และบัส 3 คือ

$$\begin{aligned} I_{13}'' &= \frac{V_1 - V_3}{\text{อิมพีแดนซ์ระหว่างบัส 1 และบัส 3}} \\ &= \frac{0.3755 - 0.3244}{j0.25} = -j0.2044 \text{ pu} \end{aligned}$$

และกระแสที่ไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับบัส 1 คือ

$$\begin{aligned} I_a'' &= \frac{E_a'' - V_1}{j0.3} \\ &= \frac{1.0 - 0.3755}{j0.3} = -j2.0817 \text{ pu} \end{aligned}$$

สำหรับกระแสในบรานช์อื่นๆ ก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่บัสใดๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังก็ตาม เราสามารถคำนวณหากระแสและแรงดันได้ง่ายและสะดวกโดยใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

5.10 การเลือกขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (The Selection of Circuit Breakers Rating)

กระแสฟอลต์หรือกระแสลัดวงจรที่ได้พิจารณามาแล้วตามหัวข้อที่ 5.7 ถึงหัวข้อที่ 5.9 นั้น เป็นกระแสขั้วทรานเซียนต์ที่สมมาตร ซึ่งยังไม่ได้รวมผลของส่วนประกอบกระแสตรงเข้าไปด้วย ในความเป็นจริงถ้าเกิดฟอลต์ที่จุดใดๆ ของรูปคลื่นแรงดันที่ไม่ใช่ค่ายอดจะต้องมีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย จึงทำให้กระแสฟอลต์รวมเป็นกระแสขั้วทรานเซียนต์ไม่สมมาตรและจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิผลของกระแสฟอลต์รวมนี้มีค่าสูงกว่ากระแสขั้วทรานเซียนต์สมมาตร

5.10.1 แฟกเตอร์การคูณ (Multiplying Factor)

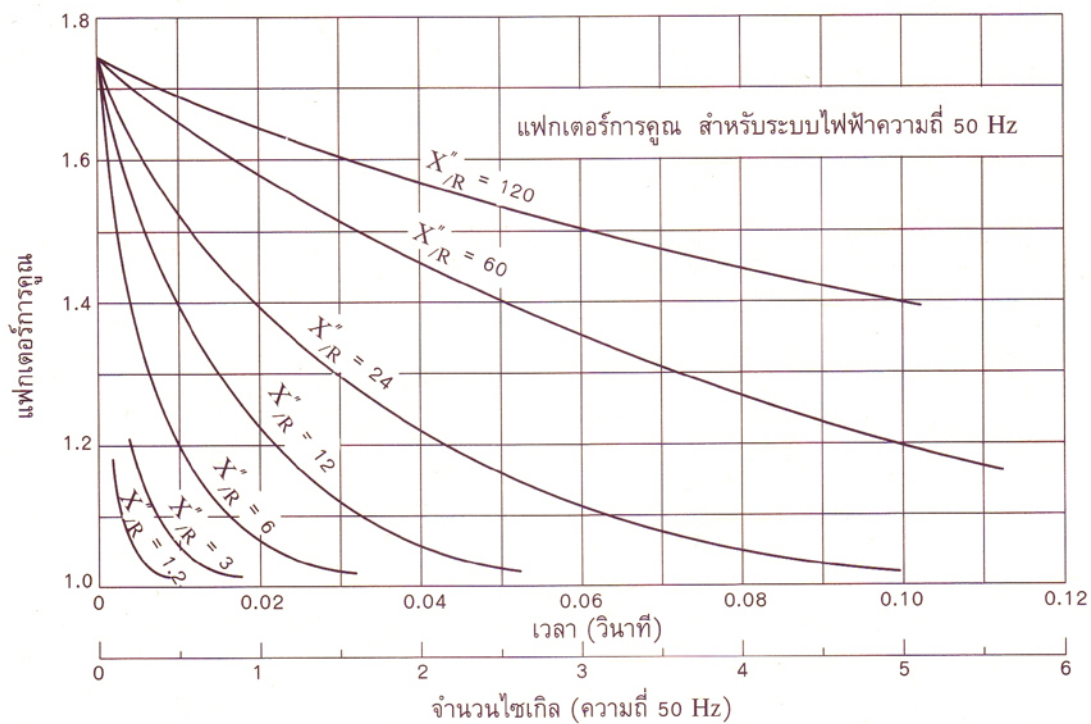
แฟกเตอร์การคูณใช้สำหรับเปลี่ยนค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นกระแสสลับสมมาตรเป็นกระแสประสิทธิผลที่ไม่สมมาตร โดยรวมส่วนประกอบกระแสตรงเข้าไปด้วย การเลือกค่าแฟกเตอร์การคูณเพื่อนำมาใช้งานนั้นจะพิจารณาได้ดังนี้

1. เป็นกรณีทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันมากกว่า 600 โวลต์ เราสามารถใช้แฟกเตอร์การคูณที่ค่า 1.6 คูณกับค่าประสิทธิผลที่ครึ่งไซเคิลแรกของกระแสสลับสมมาตรก็จะได้กระแสไม่สมมาตรรวม

2. สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน 5000 โวลต์ และน้อยกว่าที่ไม่มีการผลิตไฟฟ้าในท้องถิ่นนั้น (local generation) หมายความว่าต้องรับพลังไฟฟ้าจากบัสที่ต้องผ่านหม้อแปลงหรือสายส่งที่ยาว แฟกเตอร์การคูณที่ใช้คำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมที่ครึ่งไซเคิลแรกสามารถลดลงได้เป็นค่า 1.5

3. สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน 600 โวลต์และน้อยกว่า แฟกเตอร์การคูณเพื่อคำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมที่ครึ่งไซเคิลแรกคือ 1.25

สำหรับการคำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมในช่วงเวลาที่ยาวกว่าครึ่งไซเคิลแรก เช่น 3 ถึง 8 ไซเคิล ซึ่งสอดคล้องกับเวลาในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เราสามารถหาแฟกเตอร์การคูณได้จากเส้นโค้งอัตราส่วน X/R (X/R ratio curve) ในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 เส้นโค้งแฟกเตอร์การคูณที่สอดคล้องกับการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน X/R ต่างๆ กัน

5.10.2 โมเมนเทรีดีวตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Momentary Duty of Circuit Breakers)

กระแสลัดวงจรเริ่มต้น (ภายในเวลา 1/2 ไซเกิล หรือครึ่งไซเกิลแรกหลังจากเกิดลัดวงจร) หรือกระแสชั้บทรานเซียนต์จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้สำหรับหาโมเมนเทรีดีวตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ กล่าวคือในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นที่จุดใดๆ ของวงจรในระบบไฟฟ้า กำลังโดยไม่ต้องนำส่วนประกอบกระแสตรงมาคิดด้วยนั้นสามารถทำได้โดยคุณกระแสชั้บทรานเซียนต์นี้ด้วยแฟกเตอร์การคูณเพื่อยกระดับของกระแสชั้บทรานเซียนต์ให้สูงขึ้นเป็นกระแสไม่สมมาตรรวมตามที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี การทำเช่นนี้เพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนทานต่อแรงกระทำทางกลที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเกิลแรกหลังจากเกิดลัดวงจรขึ้น โดยเราจะเรียกกระแสลัดวงจรประสิทธิภาพเริ่มต้นนี้ว่า *กระแสโมเมนเทรี (momentary current)* ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้งานต้องสามารถทนทานต่อกระแสโมเมนเทรีนี้ได้

สำหรับทางปฏิบัติแฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับกระแสชั้บทรานเซียนต์จะมีความสอดคล้องกับระดับแรงดันของระบบที่นำเซอร์กิตเบรกเกอร์ไปใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับกระแสชั้บทรานเซียนต์เพื่อคำนวณหาค่ากระแสโมเมนเทรีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องทนทานได้

| ระดับแรงดันที่งานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ | แฟกเตอร์การคูณสำหรับคำนวณหากระแสโมเมนเทรี |
|---------------------------------------|---|
| แรงดันมากกว่า 5 kV | 1.6 |
| แรงดัน 5 kV และน้อยกว่า | 1.5 |
| แรงดัน 600 V และน้อยกว่า | 1.25 |

5.10.3 อินเตอร์รัปติงคาปาซิตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (The Interrupting Capacity of Circuit Breakers)

พิกัดการตัดกระแส (interrupting rating) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะกำหนดเป็นหน่วยกิโลโวลต์-แอมแปร์ (kVA) หรือเมกะโวลต์-แอมแปร์ (MVA) โดยพิกัดการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\text{พิกัดการตัดกระแส kVA} = \sqrt{3} \times V_{CB} \times IC \quad (5.27)$$

เมื่อ

V_{CB} คือ ระดับแรงดันของบัสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออยู่, kV

IC คือ ระดับกระแสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับได้เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสเราเรียก IC ว่า กระแสอินเตอร์รัปติง (interrupting current)

5.10.3.1 กระแสอินเตอร์รัปติง IC

เซอร์กิตเบรกเกอร์ต่างๆ ไปจะต้องตัดกระแสลัดวงจรที่ไม่สมมาตรคือ ยังมีส่วนประกอบกระแสตรงที่กำลังลดลงรวมอยู่ ซึ่งเป็นกระแสอินเตอร์รัปติงนั่นเอง กระแสอินเตอร์รัปติงจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงทรานเซียนต์ ดังนั้นจึงมีค่าต่ำกว่ากระแสโมเมนเทรีและขึ้นอยู่กับความเร็วในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น 1.5, 3, 5 หรือ 8 ไซเกิล ซึ่งความเร็วในการตัดกระแสนี้จะเริ่มนับเวลาตั้งแต่เกิดการลัดวงจรขึ้นจนกระทั่งอาร์ก (arc) ที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดับ (extinction) ลง สำหรับค่าของกระแสอินเตอร์รัปติงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$IC = I_f'' \times MF \quad (5.28)$$

เมื่อ I_f'' คือ กระแสชั้ทรานเซียนต์ที่คำนวณได้จากการศึกษาการลัดวงจร
 MF คือ แฟกเตอร์การคูณหาได้จากเส้นโค้งในรูปที่ 5.30

การหาแฟกเตอร์การคูณจากรูปที่ 5.30 จะต้องทราบตัวประกอบสองสิ่งคือ อัตราส่วน X/R ของจุดที่เกิดลัดวงจรและความเร็วในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น บัสที่ลัดวงจรมีอัตราส่วน $X/R = 24$ และเบรกเกอร์มีความเร็วในการตัดกระแสที่ 3 ไซเกิล ดังนั้นตามเส้นโค้งในรูปที่ 5.30 จะหาค่าแฟกเตอร์การคูณ $MF = 1.11$

ตัวอย่างที่ 5.5 จากแผนภาพเส้นเดียวในรูปที่ 5.31 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัด 40 MVA, 13.8 kV, ชั้ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ $X_d'' = 0.06$ pu และขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความต้านทาน $R = 0.001$ pu เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับบัสโดยผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ ถ้าเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมมูลขึ้นที่บัส จงพิจารณาเลือกขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับตัดกระแสด้วยความเร็ว 3 ไซเกิลที่ความถี่ 50 Hz

ส่วนประกอบสมมาตร

ตอนต้นของบทที่ 5 เราได้กล่าวถึงฟอลต์ประเภทต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังไปแล้ว ซึ่งมีทั้งฟอลต์แบบสมมาตรหรือฟอลต์แบบสมดุล และฟอลต์แบบไม่สมมาตรหรือฟอลต์แบบไม่สมดุล ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (power system protection) ให้พ้นอันตรายจากฟอลต์ประเภทต่างๆ นั้นมีความจำเป็นต้องทราบขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน (protective devices) เช่น รีเลย์ป้องกัน เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันและกระแสภายใต้สภาวะการณที่เกิดฟอลต์ไว้ล่วงหน้า เพื่อจะได้จัดเตรียมแผนการป้องกันระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

ในการวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรนั้นเราจะใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตร (symmetrical components) โดยในปี ค.ศ. 1918 ซี. แอล. ฟอรัทส์คู (C. L. Fortescue) ได้เสนอวิธีสำหรับการแก้ปัญหาระบบที่ไม่สมดุลของ n เฟสเซอร์ที่มีความสัมพันธ์กันด้วยระบบ n เฟสเซอร์ที่สมดุลเรียกว่า ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์เดิม (symmetrical components of the original phasors) โดยแต่ละเฟสเซอร์ของ n เฟสเซอร์จะมีขนาดและมุมเฟสระหว่างเฟสเซอร์ที่อยู่ใกล้กันเท่ากัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบที่ไม่สมดุลหลายเฟส แต่เราจะพิจารณาเฉพาะระบบ 3 เฟสเท่านั้น เพราะมีความสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าจริง

6.1 แนวความคิดของส่วนประกอบสมมาตร (The Concept of Symmetrical Components)

ทฤษฎีของส่วนประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาระบบ 3 เฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ 3 เฟสสมดุล จะประกอบด้วยเฟสเซอร์ของส่วนประกอบต่อไปนี้

1. ส่วนประกอบลำดับบวก (positive-sequence components)

ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสแตกต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (phase sequence) เหมือนกับเฟสเซอร์เดิม

2. ส่วนประกอบลำดับลบ (negative-sequence components)

ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสแตกต่างกัน 120° และมีลำดับเฟสตรงข้ามกับเฟสเซอร์เดิม

3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (zero-sequence components)

ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน

ในระบบ 3 เฟสที่มีลำดับเฟสของแรงดันและกระแสเป็น abc ดังนั้นลำดับเฟสของส่วนประกอบลำดับบวกของเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลคือ abc และลำดับเฟสของส่วนประกอบลำดับลบคือ acb ถ้าเฟสเซอร์เดิมของแรงดันเขียนเป็น V_a , V_b และ V_c แล้วเฟสเซอร์แรงดันของส่วนประกอบสมมาตรจะเขียนโดยการเพิ่มตัวห้อย หมายเลข 1 สำหรับส่วนประกอบลำดับบวก หมายเลข 2 สำหรับส่วนประกอบลำดับลบ และหมายเลข 0 สำหรับส่วนประกอบลำดับศูนย์ ดังนั้นส่วนประกอบลำดับบวกของ V_a , V_b และ V_c คือ V_{a1} , V_{b1} และ V_{c1} ในทำนองเดียวกันส่วนประกอบลำดับลบคือ V_{a2} , V_{b2} และ V_{c2} และส่วนประกอบลำดับศูนย์คือ V_{a0} , V_{b0} และ V_{c0} สำหรับเฟสเซอร์ของกระแสจะเขียนด้วย I และมีตัวห้อยเช่นเดียวกับเฟสเซอร์ของแรงดัน รูปที่ 6.1 แสดงส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน

สำหรับเฟสเซอร์ของแรงดัน V_a , V_b และ V_c ที่ไม่สมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (6.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (6.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (6.3)$$

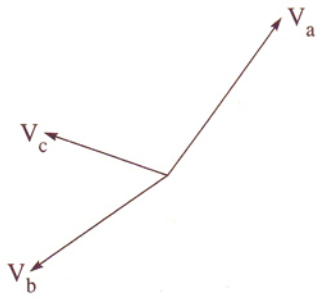
และในทำนองเดียวกันเฟสเซอร์ของกระแส I_a , I_b และ I_c ที่ไม่สมดุลคือ

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (6.4)$$

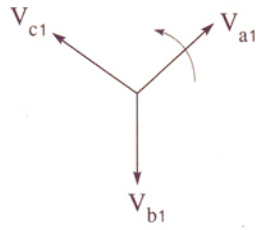
$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (6.5)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (6.6)$$

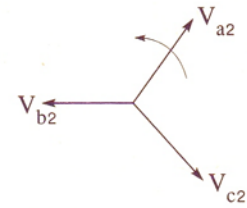
วิธีการของส่วนประกอบสมมาตรนี้จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง



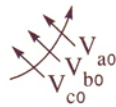
(ก) เฟสเซอร์แรงดัน 3 เฟสที่ไม่สมดุล



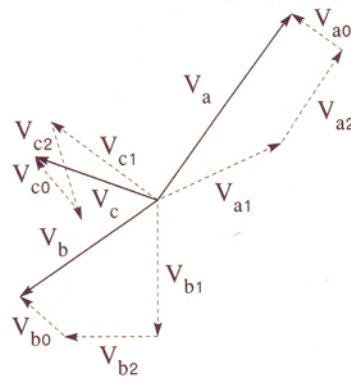
(ข) ส่วนประกอบลำดับบวก



(ค) ส่วนประกอบลำดับลบ



(ง) ส่วนประกอบลำดับศูนย์



(จ) การรวมส่วนประกอบสมมาตรของรูป (ข) ถึง (ง) เพื่อที่จะได้เฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลตามรูป (ก)

รูปที่ 6.1 ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน

6.2 โอเปอเรเตอร์ (Operator)

โอเปอเรเตอร์คือ จำนวนเชิงซ้อนที่มีขนาดเท่ากับหนึ่งหน่วย โอเปอเรเตอร์จะใช้ในการหมุนเวกเตอร์ไปยังมุมต่างๆ โดยไม่มีการเปลี่ยนขนาด โอเปอเรเตอร์ที่คุ้นเคยกันดีก็คือ -1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/180^\circ$ หมายถึงเวกเตอร์มีขนาดเท่ากับหนึ่งและหมุนไปยังมุม 180°

6.2.1 โอเปอเรเตอร์ j

กำลังของโอเปอเรเตอร์ j อาจเขียนได้หลายๆ แบบ ดังนี้

$$\begin{aligned}j &= 1 \angle 90^\circ = 1 \angle -270^\circ = 0 + j = j \\j^2 &= 1 \angle 180^\circ = 1 \angle -180^\circ = -1 + j0 = -1 \\j^3 &= 1 \angle 270^\circ = 1 \angle -90^\circ = 0 - j = -j \\j^4 &= 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1 + j0 = 1 \\j^5 &= 1 \angle 450^\circ = 1 \angle 90^\circ = 0 + j = j\end{aligned}$$

6.2.2 โอเปอเรเตอร์ a

เวกเตอร์ของระบบ 3 เฟสสมดุลจะต้องมีโอเปอเรเตอร์ที่จะหมุนเวกเตอร์ไปยังมุม 120° ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องนำมาใช้ในการคำนวณอย่างมาก โดยทั่วไปทางปฏิบัติจะใช้ตัวอักษร a แทนโอเปอเรเตอร์นี้ ดังนั้น

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เขียนโอเปอเรเตอร์ a ให้อยู่ในรูปแบบเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$a = 1 (\cos\theta + j\sin\theta) = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0.500 + j0.866$$

และ

$$a^2 = (-0.500 + j0.866)^2 = -0.500 - j0.866$$

หรือ

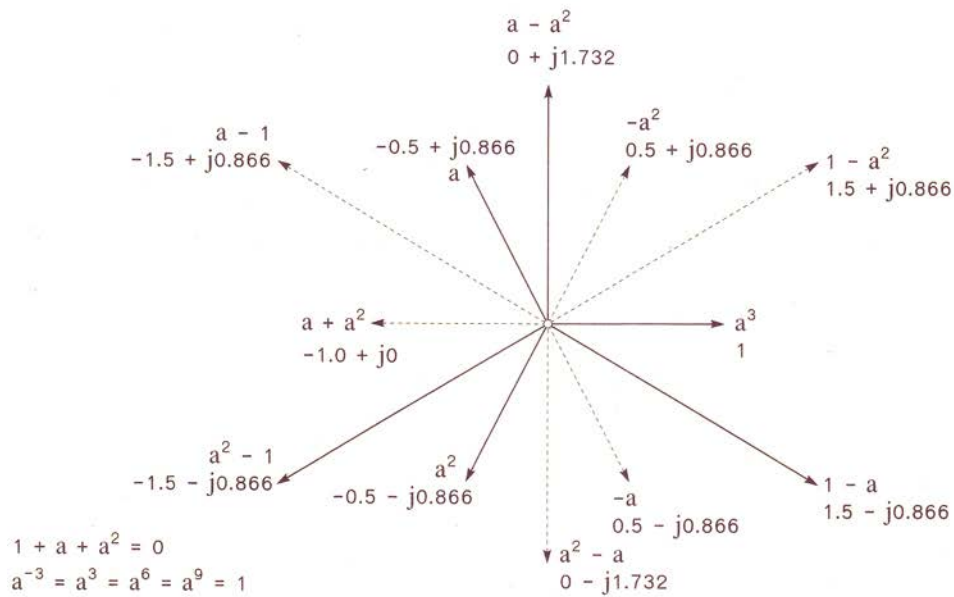
$$a^2 = a \times a = 1 \angle 120^\circ + 120^\circ = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$$

ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a จะนำมาใช้งานมากในเรื่องส่วนประกอบสมมาตร เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจึงได้สรุปค่าของฟังก์ชันโอเปอเรเตอร์ a ไว้ในตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a



ตารางที่ 6.1 ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a

| | | |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------------|
| a | $= 1 / \underline{120^\circ}$ | $= -0.5 + j0.866$ |
| a^2 | $= 1 / \underline{240^\circ}$ | $= -0.5 - j0.866$ |
| a^3 | $= 1 / \underline{360^\circ}$ | $= 1.0 + j0$ |
| a^4 | $= 1 / \underline{120^\circ}$ | $= -0.5 + j0.866 = a$ |
| $-a$ | $= 1 / \underline{-60^\circ}$ | $= 0.5 - j0.866$ |
| $-a^2$ | $= 1 / \underline{60^\circ}$ | $= 0.5 + j0.866$ |
| $1+a+a^2$ | $= 0$ | |
| $a+a^2$ | $= -1$ | |
| $a-a^2$ | $= 0 + j1.732$ | $= \sqrt{3} / \underline{90^\circ}$ |
| a^2-a | $= 0 - j1.732$ | $= \sqrt{3} / \underline{-90^\circ}$ |
| $1-a$ | $= 1.5 - j0.866$ | $= \sqrt{3} / \underline{-30^\circ}$ |
| $1-a^2$ | $= 1.5 + j0.866$ | $= \sqrt{3} / \underline{30^\circ}$ |
| $a-1$ | $= -1.5 + j0.866$ | $= \sqrt{3} / \underline{150^\circ}$ |
| a^2-1 | $= -1.5 - j0.866$ | $= \sqrt{3} / \underline{-150^\circ}$ |



รูปที่ 6.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a

6.3 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร (The Symmetrical Components of Unsymmetrical Phasors)

จากรูปที่ 6.1 ได้แสดงให้เห็นว่าเฟสเซอร์เดิมจะมีค่าเท่ากับการรวมส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์เข้าด้วยกัน ตามที่ได้ระบุไว้ในสมการที่ (6.1), (6.2) และ (6.3) ซึ่งหัวข้อนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงการแก้ปัญหาเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร โดยการใช้ส่วนประกอบสมมาตรว่าทำได้อย่างไร

ถ้าเรากำหนดให้เฟส a เป็นเฟสอ้างอิง และด้วยการใช้โอเปอเรเตอร์ a ดังนั้นส่วนประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 6.1 (ข) (ค) และ (ง) ประกอบ)

$$\left. \begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} \\ V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{c0} = V_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

แทนค่าสมการที่ (6.7) ลงในสมการที่ (6.2) และสมการที่ (6.3) จะได้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (6.8)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (6.9)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (6.10)$$

สมการที่ (6.8) ถึง (6.10) เป็นที่ทราบกันดีคือ สมการสังเคราะห์ (synthesis equation) สามารถเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

หรือ

$$[\mathbf{V}_{abc}] = [\mathbf{A}][\mathbf{V}_{012}] \quad (6.12)$$

เมื่อ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$[\mathbf{V}_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$[\mathbf{V}_{012}] = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

และจากการทำอินเวิร์สเมทริกซ์ \mathbf{A} จะได้

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

นำค่า \mathbf{A}^{-1} ของสมการที่ (6.16) ไปคูณสมการที่ (6.11) ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

หรือ

$$[\mathbf{V}_{012}] = [\mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{V}_{abc}] \quad (6.18)$$

จากสมการที่ (6.17) สามารถเขียนแยกให้อยู่ในรูปของสมการได้คือ

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (6.19)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (6.20)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (6.21)$$

สมการที่ (6.19) ถึง (6.21) เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นสมการวิเคราะห์ (analysis equation) และถ้าต้องการทราบค่าของส่วนประกอบ V_{b0} , V_{b1} , V_{b2} , V_{c0} , V_{c1} และ V_{c2} สามารถนำค่าจากสมการที่ (6.19) ถึง (6.21) แทนในสมการที่ (6.7)

สำหรับสมการสังเคราะห์และสมการวิเคราะห์ที่อยู่ในเทอมเฟสและลำดับของกระแส สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (6.22)$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (6.23)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (6.24)$$

และ

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (6.25)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (6.26)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (6.27)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

หรือ

$$[\mathbf{I}_{abc}] = [\mathbf{A}][\mathbf{I}_{012}] \quad (6.29)$$

และ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

หรือ

$$[\mathbf{I}_{012}] = [\mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{I}_{abc}] \quad (6.31)$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ผลรวมของกระแสไลน์จะเท่ากับกระแส I_n ที่ไหลกลับสู่จุดนิวทรัล
ดังนั้น

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (6.32)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.25) จะได้

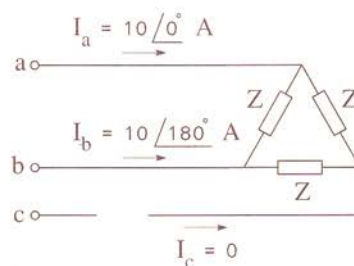
$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n$$

หรือ

$$I_n = 3 I_{a0} \quad (6.33)$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่มีกระแสไหลผ่านนิวทรัล กระแส I_n มีค่าเป็นศูนย์ และกระแส
ไลน์ก็จะมีส่วนประกอบลำดับศูนย์ สำหรับโหลด 3 เฟสที่ต่อแบบเดลต้าจะไม่มีส่วนของนิวทรัล
ดังนั้นกระแสไลน์ที่ไหลผ่านโหลดที่ต่อแบบเดลต้านี้จะไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์เช่นเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 6.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีตัวนำเฟสหนึ่งเปิดวงจรอยู่ กระแสไลน์ที่ไหลผ่านโหลดต่อ
แบบเดลต้าของเฟส a มีค่า 10A ถ้าให้กระแสของเฟส a เป็นเฟสอ้างอิง และตัวนำของเฟส c เปิด
วงจร ดังแสดงในรูปที่ 6.3 จงหาส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไลน์



รูปที่ 6.3 วงจรไฟฟ้า

วิธีทำ จากรูปที่ 6.3 กระแสไลน์ของแต่ละเฟสคือ

$$I_a = 10 \angle 0^\circ \text{ A}, I_b = -10 \angle 0^\circ = 10 \angle 180^\circ \text{ A}, \text{ และ } I_c = 0 \text{ A}$$

จากสมการที่ (6.25) ถึง (6.27)

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 0) = 0$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 120 + 0) \\ &= 5 - j2.89 = 5.78 \angle -30^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 240 + 0) \\ &= 5 + j2.89 = 5.78 \angle 30^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (6.7)

$$\begin{aligned} I_{b1} &= a^2I_{a1} = 5.78 \angle -30^\circ + 240^\circ \\ &= 5.78 \angle 210^\circ = 5.78 \angle -150^\circ \text{ A} = -5 - j2.89 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{c1} &= aI_{a1} = 5.78 \angle -30^\circ + 120^\circ \\ &= 5.78 \angle 90^\circ \text{ A} = 0 + j5.78 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{b2} &= aI_{a2} = 5.78 \angle 30^\circ + 120^\circ \\ &= 5.78 \angle 150^\circ \text{ A} = -5 + j2.89 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{c2} &= a^2I_{a2} = 5.78 \angle 30^\circ + 240^\circ \\ &= 5.78 \angle 270^\circ = 5.78 \angle -90^\circ \text{ A} = 0 - j5.78 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{b0} = I_{c0} = I_{a0} = 0$$

จากตัวอย่างที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของกระแส I_{c1} และ I_{c2} จะมีค่าถึงแม้ว่าตัวนำของเฟส c จะเปิดวงจรและไม่สามารถนำกระแสได้ แต่จากการรวมค่าของส่วนประกอบของกระแสไลน์ของเฟส c ($I_{c1} + I_{c2}$) ก็จะได้เท่ากับศูนย์ นั่นแสดงว่าไม่มีกระแสไหลผ่านตัวนำของเฟส c และสำหรับการรวมส่วนประกอบของกระแสไลน์ในเฟส a, เฟส b และเฟส c คือ

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ &= 0 + (5 - j2.89) + (5 + j2.89) \\ &= 10 + j0 = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \\ &= 0 + (-5 - j2.89) + (-5 + j2.89) \\ &= -10 + j0 = 10 \angle 180^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} \\ &= 0 + (0 + j5.78) + (0 - j5.78) \\ &= 0 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 6.2 จงหาส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันที่มีเฟสเซอร์ไม่สมดุลต่อไปนี้

$$V_a = 7.3 \angle 12.5^\circ, V_b = 0.4 \angle -100^\circ \text{ และ } V_c = 4.4 \angle 154^\circ \text{ V}$$

วิธีทำ

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

$$= \frac{1}{3} (7.3 \angle 12.5^\circ + 0.4 \angle -100^\circ + 4.4 \angle 154^\circ)$$

$$= 1.47 \angle 45.1^\circ \text{ V}$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$= \frac{1}{3} (7.3 \angle 12.5^\circ + 0.4 \angle -100^\circ + 120^\circ + 4.4 \angle 154^\circ + 240^\circ)$$

$$= 3.97 \angle 20.5^\circ \text{ V}$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c)$$

$$= \frac{1}{3} (7.3 \angle 12.5^\circ + 0.4 \angle -100^\circ + 240^\circ + 4.4 \angle 154^\circ + 120^\circ)$$

$$= 2.52 \angle -19.7^\circ \text{ V}$$

$$V_{b0} = V_{c0} = V_{a0} = 1.47 \angle 45.1^\circ \text{ V}$$

$$V_{b1} = a^2V_{a1} = 3.97 \angle 20.5^\circ + 240^\circ$$

$$= 3.97 \angle 260.5^\circ \text{ V}$$

$$V_{b2} = aV_{a2} = 2.52 \angle -19.7^\circ + 120^\circ$$

$$= 2.52 \angle 100.3^\circ \text{ V}$$

$$V_{c1} = aV_{a1} = 3.97 \angle 20.5^\circ + 120^\circ$$

$$= 3.97 \angle 140.5^\circ \text{ V}$$

$$V_{c2} = a^2V_{a2} = 2.52 \angle -19.7^\circ + 240^\circ$$

$$= 2.52 \angle 220.3^\circ \text{ A}$$

เมื่อทำการตรวจสอบจะได้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$= 3.97 \angle 20.5^\circ + 2.52 \angle -19.7^\circ + 1.47 \angle 45.1^\circ$$

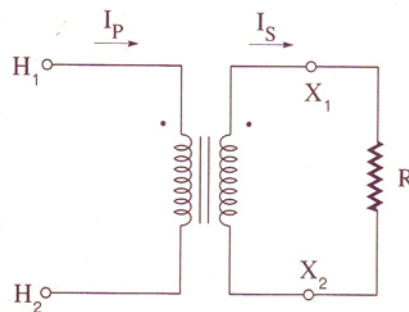
$$= (3.72 + j1.39) + (2.37 - j0.85) + (1.04 + j1.04)$$

$$= 7.13 + j1.58 = 7.30 \angle 12.5^\circ \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
&= 3.97 \angle 260.5^\circ + 2.52 \angle 100.3^\circ + 1.47 \angle 45.1^\circ \\
&= (-0.66 - j3.92) + (-0.45 + j2.48) + (1.04 + j1.04) \\
&= -0.07 - j0.4 = 0.40 \angle -99.93^\circ \text{ V} \\
V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\
&= 3.97 \angle 140.5^\circ + 2.52 \angle 220.3^\circ + 1.47 \angle 45.1^\circ \\
&= (-3.06 + j2.53) + (-1.92 - j1.63) + (1.04 + j1.04) \\
&= -3.94 + j1.94 = 4.39 \angle 153.78^\circ \text{ V}
\end{aligned}$$

6.4 การพิจารณาขั้วและการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง (Transformer Polarity and Phase-Shift Considerations)

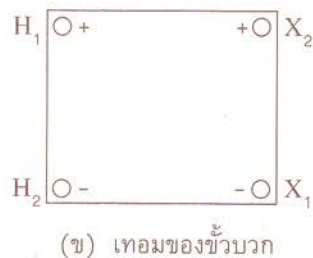
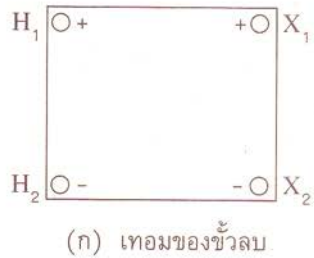
เครื่องหมาย (marking) ตามมาตรฐานของหม้อแปลงหนึ่งเฟสขั้วที่มีจุด (dots) บนขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำจะแทนด้วย H_1 และ X_1 ตามลำดับ โดยที่ปลายขั้วอีกข้างหนึ่งของขดลวดจะแทนด้วย H_2 และ X_2 ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 โดอะแกรมของหม้อแปลง 1 เฟส ที่กำกับด้วยเครื่องหมายตามมาตรฐาน และสมมติให้ทิศทางการไหลของกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นบวก

จากรูปที่ 6.4 จุดที่กำกับที่ขั้วของขดลวดจะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสไหลจากขั้วที่มีจุดไปยังขั้วที่ไม่มีจุด สำหรับกระแส I_p และ I_s จะมีเฟสเดียวกัน และกระแสเป็นบวกเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วที่ไม่มีจุดกำกับ กล่าวคือกระแสไหลเข้าขั้วที่มีจุดของขดลวดหนึ่ง (I_p) และไหลออกจากขั้วที่มีจุดของอีกขดลวดหนึ่ง (I_s) ซึ่งขดลวดทั้งสองอยู่บนแกนหม้อแปลงเดียวกัน

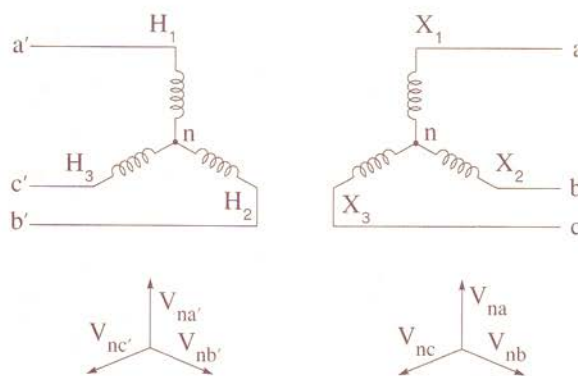
หม้อแปลงจะมีเทอมของขั้วบวก (additive polarity) และขั้วลบ (subtractive polarity) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางกายภาพของตำแหน่งขั้ว H และขั้ว X รูปที่ 6.5 (ก) แสดงความสัมพันธ์ของขั้วลบ และรูปที่ 6.5 (ข) แสดงความสัมพันธ์ของขั้วบวก



รูปที่ 6.5 การกำกับเครื่องหมายเพื่อแสดงขั้วของหม้อแปลง

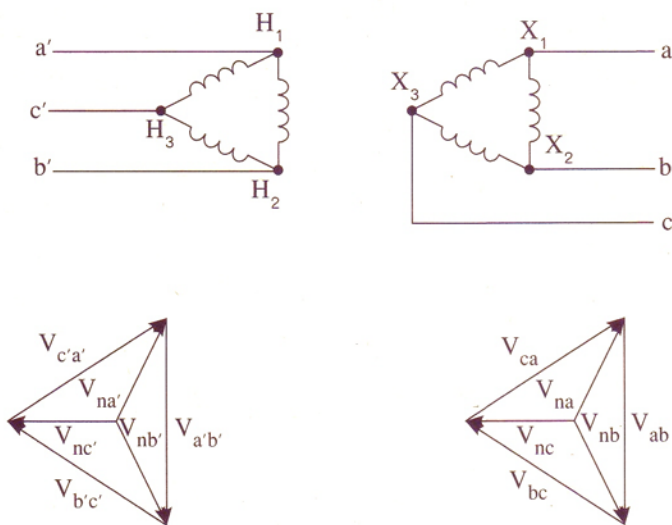
ในการตรวจสอบขั้วหม้อแปลงทำได้โดยการต่อขั้วด้านบน (ระหว่างขั้ว H และขั้ว X) เข้าด้วยกันแล้วป้อนแรงดันที่ขดลวดด้านใดด้านหนึ่ง และวัดแรงดันระหว่างขั้วด้านล่างว่าแรงดันนี้จะเป็นผลบวกหรือผลต่างของขดลวด H และ X ตามรูปที่ 6.5 (ก) จะวัดได้เป็นผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว H_2 และ X_2 ดังนั้นจึงเป็นขั้วลบ ในทำนองเดียวกันแรงดันระหว่างขั้ว H_2 และ X_1 ของรูปที่ 6.5 (ข) จะวัดได้เป็นผลบวก

สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส ขั้วทางด้านแรงสูงจะกำกับด้วยเครื่องหมาย H_1, H_2 และ H_3 และขั้วทางด้านแรงต่ำกำกับด้วยเครื่องหมาย X_1, X_2 และ X_3 และสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-วาย และแบบเดลต้า-เดลต้า แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว H_1, H_2 และ H_3 จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว X_1, X_2 และ X_3 ตามลำดับ ดังแสดงตามรูปที่ 6.6



(ก) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย

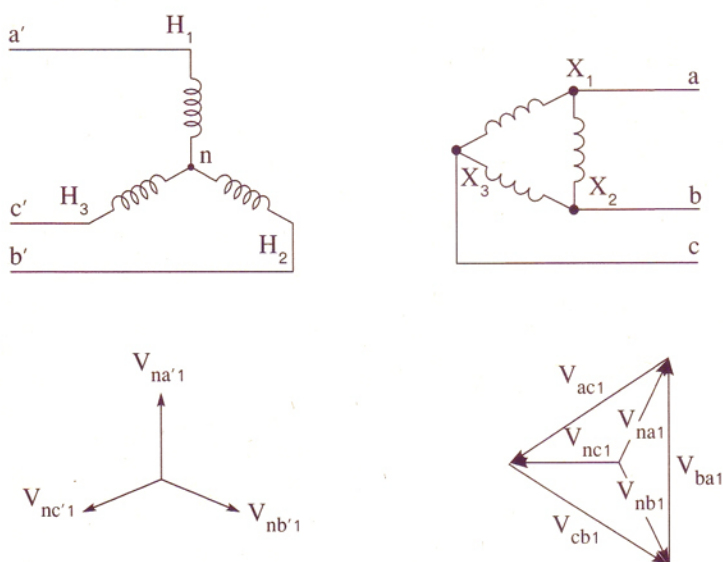
รูปที่ 6.6 เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-วายและแบบเดลต้า-เดลต้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0°



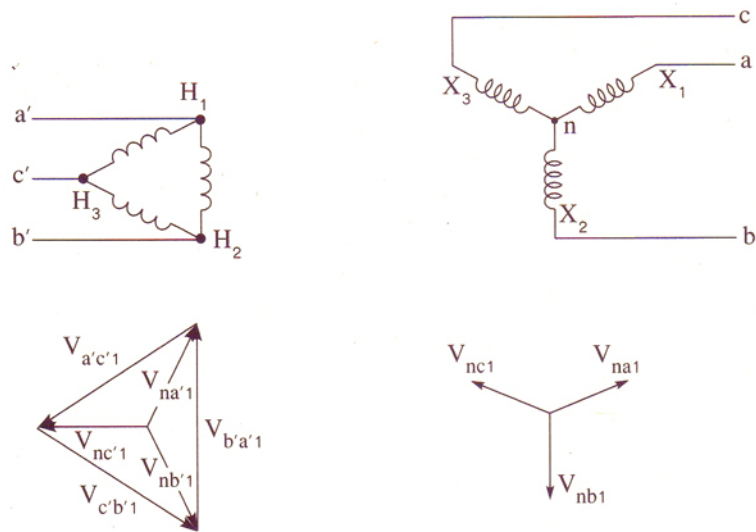
(ข) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเดลต้า-เดลต้า

รูปที่ 6.6 (ต่อ) เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-วายและแบบเดลต้า-เดลต้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0°

สำหรับหม้อแปลง 3 เฟสที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้าและแบบเดลต้า-วาย จะมีแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว H_1 , H_2 และ H_3 นำหน้าแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว X_1 , X_2 และ X_3 ตามลำดับ เป็นมุม 30° ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้า ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30°



รูปที่ 6.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับขั้ว สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30°

จากรูปที่ 6.7 แสดงการเลื่อนเฟสเป็นมุม 30° สำหรับการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้า ในขณะที่รูปที่ 6.8 แสดงการเลื่อนเฟสของการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วายเป็นมุม 30° เช่นกัน

เรื่องของการเลื่อนเฟสนี้จะนำไปใช้ในการหากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตร ถ้าทราบค่าของกระแสไลน์ทางด้านวายของหม้อแปลงที่ต่อแบบวาย-เดลต้าจะทำให้สามารถหาค่าของกระแสไลน์ทางด้านเดลต้าได้หลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งก็โดยการใช้ส่วนประกอบสมมาตร โดยการเลื่อนเฟสแรงดันและกระแสลำดับขั้วและลำดับลบด้วยมุมที่พอเหมาะ สำหรับแรงดันลำดับขั้วมีการเลื่อนเฟสไป 30° ตามที่ได้กล่าวไปแล้วตั้งเฟสเซอร์ในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 ส่วนเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางด้านแรงสูงและแรงต่ำของระบบลำดับลบได้แสดงในรูปที่ 6.9 ตามการใช้หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้าของรูปที่ 6.7 สำหรับไดอะแกรมของรูปที่ 6.9 ได้แสดงแรงดันสูงล่าหลังแรงดันต่ำเป็นมุม 30° ในขณะที่แรงดันลำดับขั้วตามรูปที่ 6.7 แรงดันสูงจะนำหน้าแรงดันต่ำเป็นมุม 30°



$$I_{b(g)} = 3857 \angle 240^\circ \text{ pu}$$

$$I_{c(g)} = 3857 \angle 120^\circ \text{ pu}$$

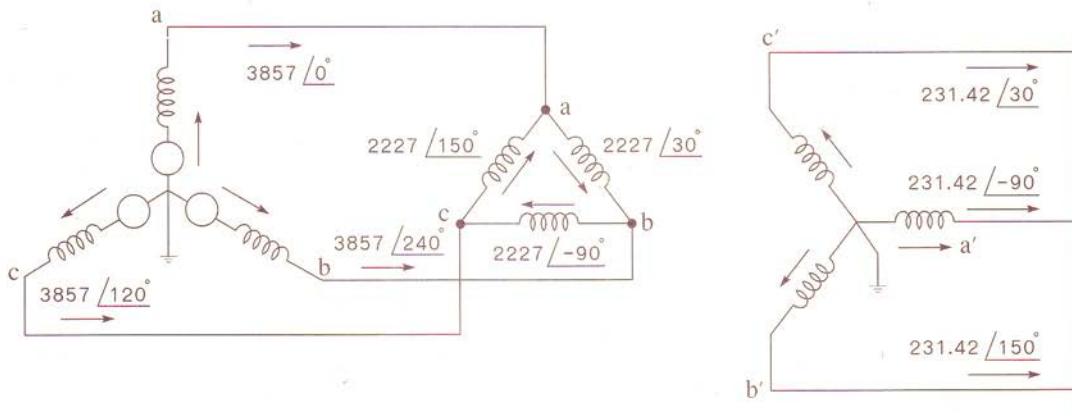
กระแสฟอลต์ในวงจรหม้อแปลงทางด้านเดลต้า (ด้านแรงต่ำ) คือ

$$I_{ab(T)} = \frac{3857}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ = 2227 \angle 30^\circ \text{ A}$$

$$I_{bc(T)} = 2227 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_{ca(T)} = 2227 \angle 150^\circ \text{ A}$$

จากการคำนวณกระแสฟอลต์ในส่วนต่างๆ สามารถนำมาแสดงในไดอะแกรม 3 เฟสได้ตามรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 ไดอะแกรม 3 เฟสที่แสดงกระแสฟอลต์ในส่วนต่างๆ

6.5 กำลังไฟฟ้าในเทอมของส่วนประกอบสมมาตร (Power in Terms of Symmetrical Components)

ถ้าเราทราบค่าส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแส จะทำให้สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าในวงจร 3 เฟสได้โดยตรงจากส่วนประกอบเหล่านี้ โดยกำลังเชิงซ้อนที่ไหลอยู่ในวงจร 3 เฟส ผ่านไลน์เฟส a, b และ c คือ

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (6.41)$$

เมื่อ

V_a, V_b และ V_c คือ แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล

I_a, I_b และ I_c คือ กระแสที่ไหลในไลน์ a, b และ c ตามลำดับ

จากสมการที่ (6.41) เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (6.42)$$

เราสามารถแสดงกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแส โดยใช้สมการที่ (6.11) และสมการที่ (6.13) ดังนี้

$$S = [AV]^T [AI]^* \quad (6.43)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.44)$$

จากกฎรีเวอร์ซัล (reversal law) ของเมทริกซ์คือ ทรานโพสของผลคูณของสองเมทริกซ์ จะเท่ากับผลคูณของทรานโพสเมทริกซ์ที่กลับลำดับกัน ดังนั้น

$$[AV]^T = V^T A^T \quad (6.45)$$

และ

$$S = V^T A^T [AI]^* = V^T A^T A I^* \quad (6.46)$$

จะสังเกตได้ว่า $A^T = A$ และ a กับ a^2 จะเป็นค่าคอนจูเกตกัน ดังนั้นจากสมการที่ (6.46) เราจะได้

$$S = \begin{bmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (6.47)$$

เมื่อ $A^T A^*$ จะเท่ากับ

$$3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และ

$$S = 3 \begin{bmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (6.48)$$

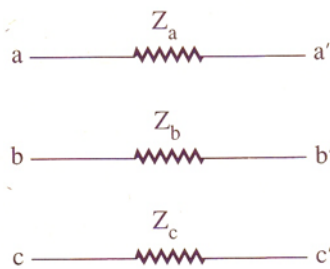
ดังนั้นกำลังเชิงซ้อนคือ

$$V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^* \quad (6.49)$$

เป็นการแสดงให้เห็นว่า กำลังเชิงซ้อนสามารถคำนวณได้จากส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแสของวงจร 3 เฟสที่ไม่สมดุล

6.6 อิมพีแดนซ์อนุกรมที่ไม่สมมาตร (Unsymmetrical Series Impedances)

ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สภาวะปกติมีความสมดุล แต่เมื่อเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตรขึ้น ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุลซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์อนุกรมของวงจรไฟฟ้า 3 เฟสนี้มีค่าไม่เท่ากันซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ระบบด้วยส่วนประกอบสมมาตร รูปที่ 6.16 แสดงส่วนที่ไม่สมมาตรของระบบด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม Z_a , Z_b และ Z_c ที่มีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 6.16 อิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบ 3 เฟสที่มีค่าไม่เท่ากัน

ถ้าสมมติให้ไม่มีอินดักแตนซ์ร่วม (mutual inductance) ระหว่างอิมพีแดนซ์ทั้งสาม ดังนั้นแรงดันตกคร่อมในระบบส่วนนี้สามารถแสดงด้วยสมการเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6.50)$$

และแรงดันตกคร่อมที่เขียนในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแสคือ

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.51)$$

เมื่อ \mathbf{A} คือเมทริกซ์มีค่าตามสมการที่ (6.13) ถ้านำสมการที่ (6.51) คูณด้วย \mathbf{A}^{-1} ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A} \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} &= \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \mathbf{A} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a & Z_b & Z_c \\ Z_a & aZ_b & a^2Z_c \\ Z_a & a^2Z_b & aZ_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} \\ I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$V_{aa'1} = \frac{1}{3} \left[Z_a (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + aZ_b (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2}) + a^2Z_c (I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2}) \right]$$

$$V_{aa'2} = \frac{1}{3} \left[Z_a (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + a^2Z_b (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2}) + aZ_c (I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2}) \right]$$

$$V_{aa'0} = \frac{1}{3} \left[Z_a (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + Z_b (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2}) + Z_c (I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2}) \right]$$

เมื่อจัดเรียงเทอมใหม่จะได้

$$\left. \begin{aligned} V_{aa'1} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) \\ &\quad + \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) \\ V_{aa'2} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + Z_b + Z_c) \\ &\quad + \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) \\ V_{aa'o} &= \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) \\ &\quad + \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + Z_b + Z_c) \end{aligned} \right\} \quad (6.52)$$

ถ้าสามารถทำให้อิมพีแดนซ์ทั้งสามมีค่าเท่ากัน ($Z_a = Z_b = Z_c$) สมการที่ (6.52) จะลดรูปเป็น

$$V_{aa'1} = I_{a1} Z_a \quad V_{aa'2} = I_{a2} Z_a \quad V_{aa'o} = I_{a0} Z_a \quad (6.53)$$

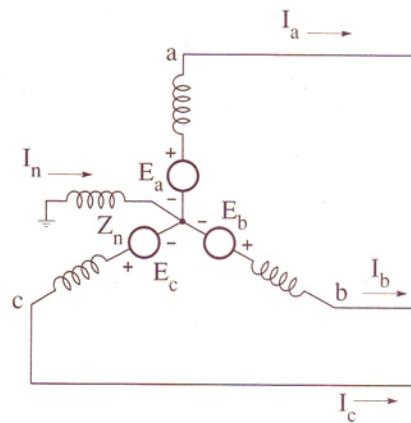
6.7 ลำดับของอิมพีแดนซ์และลำดับของวงจรไฟฟ้า (Sequence Impedances and Sequences Networks)

ในวงจรไฟฟ้าใดๆ เมื่อมีกระแสลำดับบวกเพียงอย่างเดียวไหลผ่านอิมพีแดนซ์ เราจะเรียกอิมพีแดนซ์นี้ว่า อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (positive-sequence impedance) ในทำนองเดียวกัน เมื่อกระแสลำดับลบไหลผ่านก็จะเรียกอิมพีแดนซ์นี้ว่า อิมพีแดนซ์ลำดับลบ (negative - sequence impedance) และเมื่อกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์นี้ก็เรียกว่า อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (zero-sequence impedance)

การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรด้วยระบบสมมาตรนั้น จะต้องหาส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมดุลที่ไหลในวงจร ส่วนประกอบของกระแสลำดับใดลำดับหนึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่มีลำดับเหมือนกับกระแสนั้น และจะเป็นอิสระต่อกระแสลำดับอื่นๆ ในระบบที่สมดุล กระแสลำดับใดลำดับหนึ่งอาจพิจารณาให้ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจร ที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสลำดับนั้นเพียงอย่างเดียว วงจรสมมูลต่อเฟสที่ประกอบขึ้นด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสของลำดับใดลำดับหนึ่งเพียงอย่างเดียว เราจะเรียกวงจรสมมูลนี้เป็นลำดับของวงจรไฟฟ้า (sequence network) สำหรับลำดับนั้นๆ ลำดับของวงจรไฟฟ้าจะรวมแรงดันเหนี่ยวนำใดๆ ที่มีลำดับเหมือนกันเข้าไว้ด้วย และจะนำมาต่อเชื่อมเพื่อให้มีกระแส I_{a1} , I_{a2} และ I_{a0} ไหลผ่านวงจรตามเงื่อนไขของการเกิดฟอลต์ชนิดต่างๆ ดังนั้นการคำนวณหาผลของฟอลต์ด้วยการใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาลำดับของอิมพีแดนซ์และนำมาต่อรวมกันเพื่อสร้างเป็นลำดับของวงจรไฟฟ้า

6.8 ลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด (Sequence Networks of Unloaded Generators)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์และไม่ได้ต่อโหลดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 6.17 เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีกระแส I_a , I_b และ I_c ไหลในไลน์ a, b และ c ตามลำดับ ถ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นเกี่ยวข้องกับดินก็จะเกิดกระแส I_n ไหลเข้าไปสู่จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

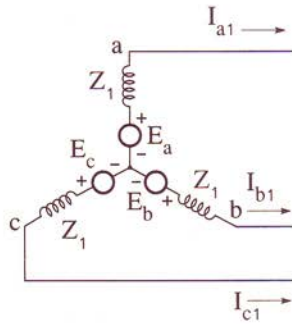


รูปที่ 6.17 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อโหลด และจุดนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสคือ E_a , E_b , และ E_c

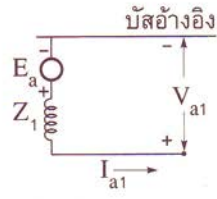
ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเขียนได้ง่าย โดยมีแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในลำดับบวกเท่านั้น เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกแบบให้จ่ายแรงดันให้กับระบบ 3 เฟสที่สมดุล ดังนั้นลำดับของวงจรจะมีส่วนประกอบดังนี้

1. วงจรลำดับบวก (positive-sequence network) จะประกอบด้วยแรงดันเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. วงจรลำดับลบ (negative-sequence network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. วงจรลำดับศูนย์ (zero-sequence network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

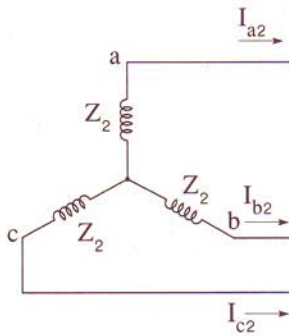
ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีส่วนประกอบของลำดับกระแสได้แสดงในรูปที่ 6.18 กระแสลำดับใดก็จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่มีลำดับเหมือนกับกระแสนั้น



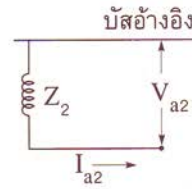
(ก)



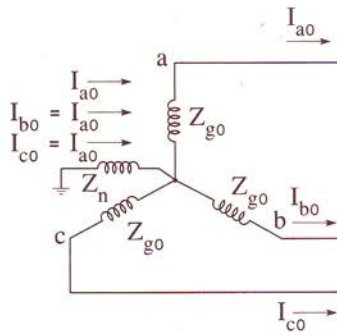
(ข)



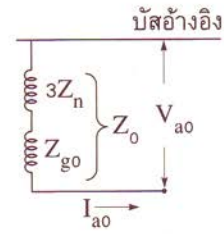
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 6.18 การไหลของกระแสของแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า (ก), (ค) และ (จ) แสดงการไหลของกระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตามลำดับ ส่วน (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงวงจรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ตามลำดับ

ลำดับของวงจรไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 6.18 คือวงจรสมมูลต่อเฟสของวงจร 3 เฟสแบบสมดุลที่มีการพิจารณาการไหลของส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมดุล แรงดันเหนี่ยวนำในวงจรลำดับบวกคือ แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลที่ชั่วขณะไม่มีโหลด ซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันทรานเซียนต์และชั้ทรานเซียนต์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด สำหรับรีแอกแตนซ์ในวงจรลำดับบวกจะเป็น ชั้ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ หรือซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ ขึ้นอยู่กับว่าขณะที่ศึกษานั้นวงจรอยู่ในเงื่อนไขของสถานะชั้ทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ หรือสภาวะอยู่ตัว

บัสอ้างอิง (reference bus) สำหรับวงจรลำดับบวกและลำดับลบก็คือ จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ามีการต่อเชื่อมระหว่างจุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดินก็จะมีส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ที่ต่อระหว่างจุดนิวทรัลกับดินคือ $3 I_{a0}$ จากรูปที่ 6.18 (จ) จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมของลำดับศูนย์จากจุด a กับดิน คือ

$$-3I_{a0}Z_n - I_{a0}Z_{g0}$$

เมื่อ Z_{g0} คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรลำดับศูนย์จะต้องมีกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ $3Z_n + Z_{g0}$ ตามที่แสดงในรูปที่ 6.18 (ฉ) ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม (total zero-sequence impedance) ที่มีกระแส I_{a0} (เป็นกระแสต่อเฟส) ไหลผ่านก็คือ

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (6.54)$$

โดยทั่วไปการเขียนสมการสำหรับลำดับของวงจรไฟฟ้า จะใช้ส่วนประกอบของแรงดันและกระแสในเฟส a สมการสำหรับส่วนประกอบของแรงดันตกคร่อมจากจุด a กับบัสอ้างอิง (หรือดิน) คือ (ดูรูปที่ 6.18 ประกอบ)

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (6.55)$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad (6.56)$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \quad (6.57)$$

เมื่อ

E_a คือ แรงดันขณะไม่มีโหลดลำดับบวกเป็นแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับบวก

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับลบ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม (ตามที่กำหนดในสมการที่ (6.54))

สมการข้างต้นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ ที่มีกระแสไม่สมดุลไหลในวงจร และสามารถใช้กับกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่อยู่ภายใต้สภาวะอยู่ตัว แต่เมื่อคำนวณในสภาวะทรานเซียนต์หรือชัตทรานเซียนต์ สามารถใช้สมการเหล่านี้ได้โดยการแทน E_a ด้วย E'_g หรือ E''_g

6.9 วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ (Positive- and Negative-Sequence Networks)

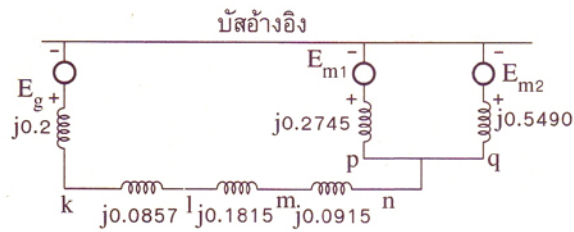
จุดมุ่งหมายของการทราบค่าลำดับอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังก็เพื่อนำไปสร้างลำดับของวงจรไฟฟ้าให้เป็นระบบที่สมบูรณ์ ซึ่งในวงจรไฟฟ้าลำดับใดก็จะแสดงการไหลของกระแสลำดับนั้นในระบบ

เราได้เคยสร้างวงจรไฟฟ้าลำดับบวกมาบ้างแล้วในบทที่ 1 การเปลี่ยนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นวงจรไฟฟ้าลำดับลบนั้นสามารถทำได้ง่าย ด้วยเหตุที่ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและมอเตอร์ 3 เฟส จะมีแรงดันเหนี่ยวนำภายในเป็นแรงดันลำดับบวกเพียงอย่างเดียว เพราะว่าได้ออกแบบมาเพื่อผลิตแรงดันที่สมดุล เมื่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบของระบบสมมาตรมีค่าเท่ากัน ทำให้การเปลี่ยนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นวงจรไฟฟ้าลำดับลบได้โดยการตัดส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำออก

เมื่อมีกระแส 3 เฟสสมดุลไหลในระบบไฟฟ้า จะทำให้จุดนิวทรัลทุกจุดของระบบสมมาตร 3 เฟส มีศักย์ไฟฟ้า (potential) เท่ากัน จุดนิวทรัลทั้งหมดนี้จะต้องมีศักย์ไฟฟ้าเดียวกันสำหรับกระแสลำดับบวกและลำดับลบ ดังนั้นจุดนิวทรัลของระบบสมมาตร 3 เฟส จะใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการกำหนดแรงดันตกคร่อมทั้งลำดับบวกและลำดับลบ และเป็นบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบด้วย

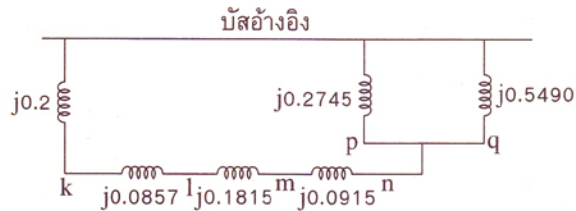
ตัวอย่างที่ 6.5 จงเขียนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบของระบบ ดังมีรายละเอียดในตัวอย่างที่ 1.15

วิธีทำ จากรีแอกแตนซ์ไดอะแกรมตามรูปที่ 1.38 คือวงจรไฟฟ้าลำดับบวกของระบบ สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 วงจรไฟฟ้าลำดับบวก

วงจรไฟฟ้าลำดับลบจะเหมือนกับวงจรไฟฟ้าลำดับบวกทุกประการ ยกเว้นวงจรไฟฟ้าลำดับลบจะไม่มีส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำ สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.20



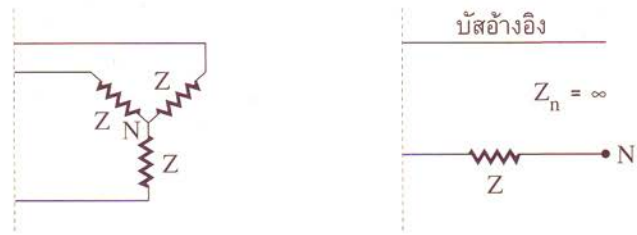
รูปที่ 6.20 วงจรไฟฟ้าลำดับลบ

6.10 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Networks)

วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์สามารถแบ่งการพิจารณาตามลักษณะของการต่อวงจรได้ดังนี้

6.10.1 วงจรที่มีการต่อแบบวางโดยนิวทรัลไม่ต่อลงดินหรือไม่ต่อกับจุดนิวทรัลอื่นๆ ในวงจร (Wye-Connection Ungrounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะทำให้ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าไปยังจุดนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อผลรวมของกระแสเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์ เสมือนว่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อระหว่างนิวทรัลกับดินมีค่าสูงมากจึงทำให้กระแสที่ไหลไปสู่ดินมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์สามารถเขียนได้โดยการเปิดวงจรระหว่างจุดนิวทรัลของวงจรที่ต่อแบบวางกับบัสอ้างอิง (อิมพีแดนซ์ระหว่างนิวทรัลกับดิน = ∞) ดังแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลไม่ต่อลงดิน

6.10.2 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อลงดินโดยตรง (Wye-Connection Solidly Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะทำให้จุดนิวทรัลกับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ต่อถึงกันโดยตรง (อิมพีแดนซ์ = 0) ดังแสดงในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อลงดินโดยตรง

6.10.3 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน (Wye-Connection Impedance Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้ทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์มีอิมพีแดนซ์ $3Z_n$ ต่ออยู่ระหว่างจุดนิวทรัลกับบัสอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 6.23

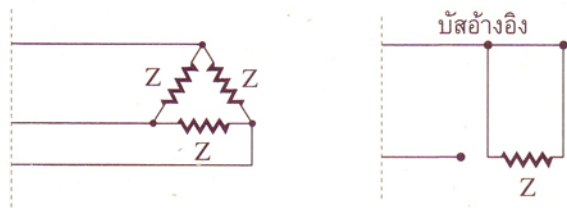


รูปที่ 6.23 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.8 ว่าแรงดันตกคร่อมลำดับศูนย์เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์เพราะกระแส I_{a0} ไหลผ่าน $3Z_n$ ซึ่งจะเหมือนกับระบบไฟฟ้าจริงที่กระแส $3 I_{a0}$ ไหลผ่าน Z_n ตัวอิมพีแดนซ์ Z_n นี้ในทางปฏิบัติอาจใช้ความต้านทานหรือรีแอกเตอร์ โดยปกติจะต่อระหว่างนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงกับดิน เพื่อใช้ในการจำกัดค่ากระแสลำดับศูนย์ระหว่างที่เกิดฟอลต์ลงดิน

6.10.4 วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า (Delta-Connection)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะไม่มีเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ในไลน์เพราะไม่มีการต่อลงดิน ดังนั้นจึงถือว่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าสูงมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่ต่อแบบเดลต้ามีการเปิดวงจรทางด้านเดลต้า แต่อีกด้านหนึ่งของการเปิดวงจรนี้จะมีการต่อระหว่างอิมพีแดนซ์ตัวเอง Z กับบัสอ้างอิง เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าอาจเป็นไปได้ที่เกิดกระแสลำดับศูนย์ไหลวนภายในวงจรเดลต้า โดยกระแสนี้อาจเกิดขึ้นโดยแรงดันลำดับศูนย์หรือโดยการเหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายภายนอก วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้ากับวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ได้แสดงในรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 วงจรลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า

6.11 ลำดับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Sequence Impedance of Transformers)

หม้อแปลง 3 เฟส อาจมีโครงสร้างของหม้อแปลงได้ 2 ประเภทคือ

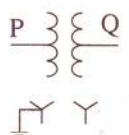
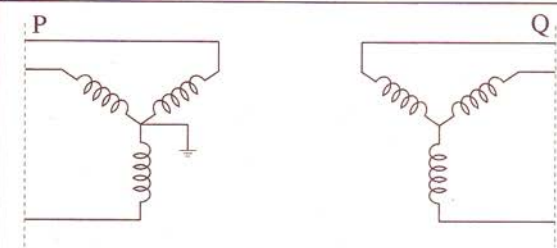
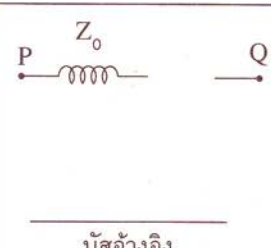
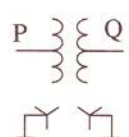
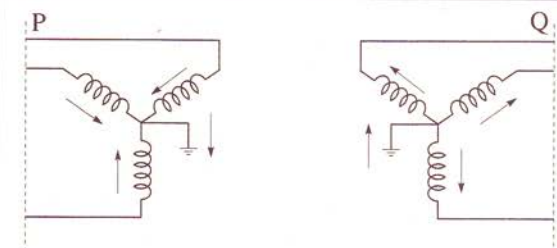
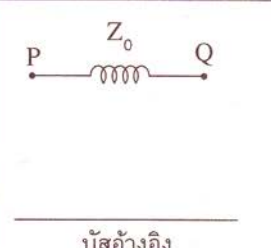
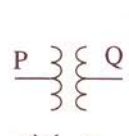
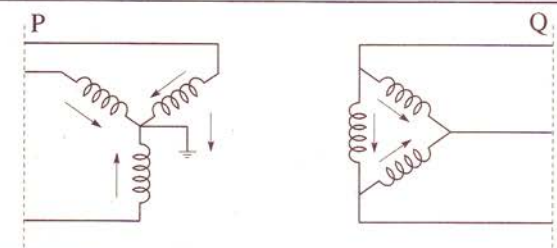
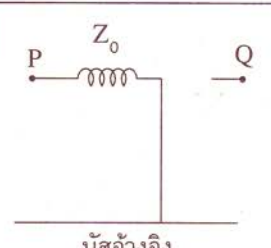
1. หม้อแปลง 3 เฟสที่มีโครงสร้างของการแบ่งกั้นหม้อแปลง 1 เฟส จำนวน 3 ลูกที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ
2. เป็นหม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างให้เป็นหม้อแปลง 3 เฟส โดยมีขดลวดทั้ง 3 เฟส ติดตั้งร่วมอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

หม้อแปลงมีอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบเหมือนกัน สำหรับอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ จะมีความแตกต่างไปจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติจะถือว่าอิมพีแดนซ์ทั้งลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์มีค่าเท่ากัน ดังสมการ

$$Z_0 = Z_1 = Z_2 = Z_{tx} \quad (6.58)$$

เมื่อ Z_{tx} คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (short circuit impedance) ของหม้อแปลง

สำหรับวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากการต่อขดลวดหม้อแปลงทั้งขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำในรูปแบบของวายและเดลต้าสามารถทำได้หลายกรณี ซึ่งจะทำให้วงจรไฟฟาลำดับศูนย์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยทั่วไปการพิจารณาการต่อขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงจะมีอยู่ 5 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 6.25 สำหรับลูกศรในไดอะแกรมการต่อขดลวด (connection diagram) แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ และถ้าไม่ปรากฏลูกศรในไดอะแกรมก็แสดงว่าไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหล

| สัญลักษณ์ | ไดอะแกรมการต่อขดลวดหม้อแปลง | วงจรสมมูลลำดับศูนย์ |
|---|---|---|
|  |  |  <p>บัสอ้างอิง</p> |
|  |  |  <p>บัสอ้างอิง</p> |
|  |  |  <p>บัสอ้างอิง</p> |

รูปที่ 6.25 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของชุดหม้อแปลง 3 เฟส ที่ประกอบด้วยไดอะแกรมการต่อขดลวด และสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพเส้นเดียว