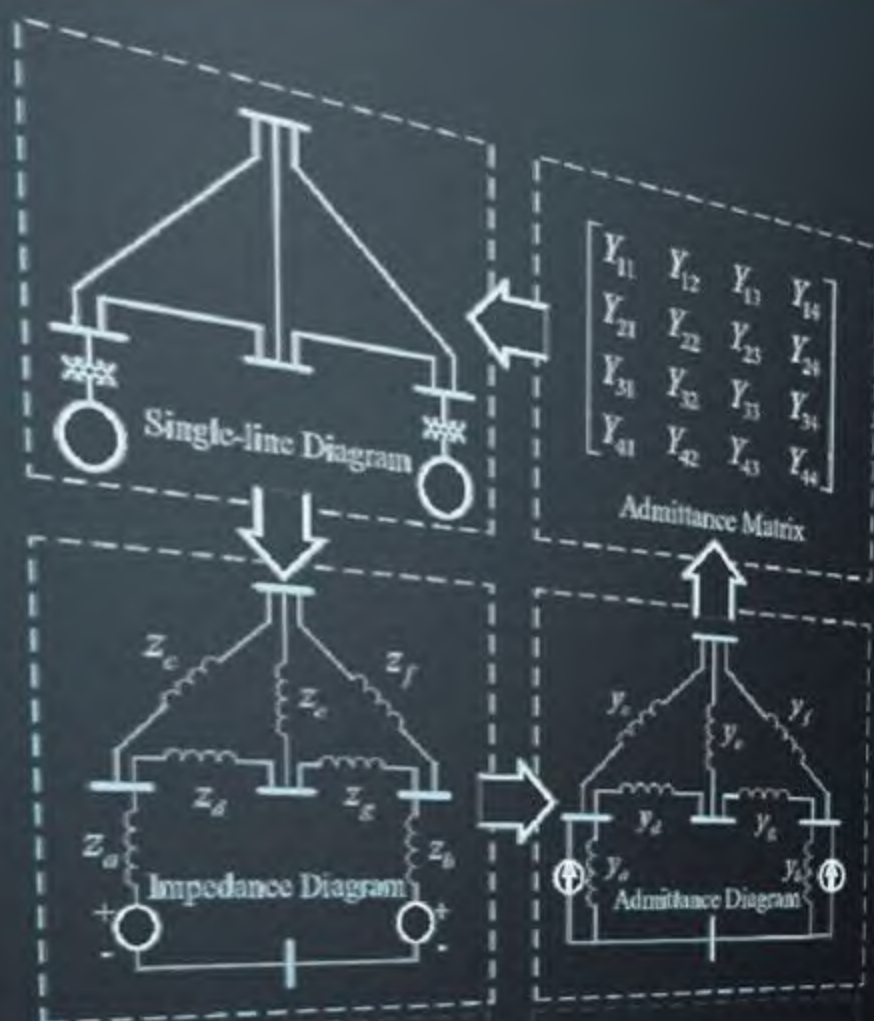


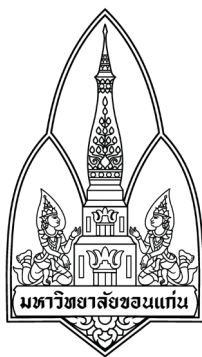


ศูนย์ส่งเสริม
การผลิตไฟฟ้า

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง Electric Power System Analysis



วรายุทธ คัมภีราวัฒน์



การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

Electric Power System Analysis

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรายุทธ คัมภีระวัฒน์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำรา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลำดับที่ 220

โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ.2566

ISBN (e-book) 978-616-438-852-9

วรายุทธ คัมภีร์วัฒน์.

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง / วรายุทธ คัมภีร์วัฒน์. -- พิมพ์ครั้งที่ 1. -- ขอนแก่น : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2566.

261 หน้า : ภาพประกอบ

1. ระบบไฟฟ้ากำลัง. 2. ระบบไฟฟ้ากำลัง -- การวิเคราะห์. 3. อิมพีแดนซ์ -- แบบจำลอง. 4. ระบบไฟฟ้ากำลัง -- การควบคุม. 5. การจ่ายพลังงานไฟฟ้า. 6. เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.

TK1001 ว321 2566

ISBN (e-book) 978-616-438-852-9

จัดทำโดย ศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ราคา 290 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2566

คำนำ

วิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นหนึ่งในศาสตร์สำคัญสำหรับการศึกษาและการทำงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า รวมถึงเป็นพื้นฐานในการต่อยอดไปสู่องค์ความรู้ขั้นสูง ตำราวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนี้ เรียบเรียงขึ้นจากเอกสารประกอบการสอน และเอกสารคำสอนของผู้ประพันธ์เอง โดยอ้างอิงเนื้อหาจากแหล่งข้อมูลที่มีความถูกต้องเชิงวิชาการ ซึ่งเคยใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งสอดแทรกความรู้จากประสบการณ์การทำงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของผู้ประพันธ์ โดยมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนรายวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า รวมถึงถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ที่สนใจ ตำราเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 12 บท โดยแบ่งการอธิบายเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 แนวคิดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบลัดวงจร และส่วนที่ 4 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง และหัวข้อที่น่าสนใจ

เนื้อหาทั้งหมดครอบคลุมรายละเอียด รายวิชาการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่จำเป็นต่อการทดสอบเพื่อขอรับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม โดยเนื้อหาส่วนที่ 1 (บทที่ 1 - 4) จะอธิบายถึงภาพรวมและความสำคัญในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงการเชื่อมโยงความรู้พื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนที่ 2 (บทที่ 5-6) และ ส่วนที่ 3 (บทที่ 7-9) จะกล่าวถึงเนื้อหาแกนหลักของรายวิชาคือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบลัดวงจร ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ในขั้นสูงต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนที่ 4 (บทที่ 10-11) ยังคงเป็นหัวข้อสำคัญตามรายละเอียดรายวิชา และในบทสุดท้าย บทที่ 12 ผู้ประพันธ์ได้อธิบายถึงหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง และการประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ ซึ่งเนื้อหาดังกล่าวเกินขอบเขตการศึกษาในระดับปริญญาตรี แต่ผู้ประพันธ์มีแนวคิดจะแนะนำหัวข้อดังกล่าวในเบื้องต้น เพื่อให้เข้าใจหลักการประยุกต์ใช้ความรู้ด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงใช้เป็นแนวทางในการต่อยอดองค์ความรู้ขั้นสูง สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หรือผู้ที่อาจจะมีโอกาสได้ทำงานเกี่ยวข้องกับหัวข้อดังกล่าวในอนาคต

ตำราเล่มนี้ได้จัดทำขึ้น ภายใต้ทุนสนับสนุนการผลิตตำราใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้ประพันธ์ใคร่ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยขอนแก่นเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย และผู้ประพันธ์หวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะมีประโยชน์ต่อนักศึกษาในการทำความเข้าใจเนื้อหาวิชาได้ดีขึ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้ประพันธ์ขอน้อมรับนำมาแก้ไขในโอกาสต่อไป

วรายุทธ คัมภีราวัฒน์

20 มิ.ย. 2566

สารบัญ

สารบัญ	ก
สารบัญรูปภาพ	จ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 พื้นฐานการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง	1
1.1 ภาพรวมและความสำคัญของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	1
1.2 ข้อกำหนดพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
1.3 ระบบต่อหน่วย	10
สรุปประเด็นสำคัญของบท	12
คำถามท้ายบท	12
บทที่ 2 แบบจำลองและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	13
2.1 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า	13
2.2 แบบจำลองและพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	15
2.3 แบบจำลองและพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	18
2.4 แบบจำลองและพารามิเตอร์ของสายส่ง	20
2.5 แบบจำลองและพารามิเตอร์ของโหลด.....	23
สรุปประเด็นสำคัญของบท	24
คำถามท้ายบท	24
บทที่ 3 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์	25
3.1 แนวคิดเบื้องต้นของแบบจำลองแอดมิตแตนซ์.....	25
3.2 โหนดแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์	26
3.3 บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์.....	28
3.4 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์	29
3.5 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์กรณีที่มีความเหนี่ยวนำร่วม	33
3.6 การปรับปรุงแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์.....	39
3.7 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้แอดมิตแตนซ์เมทริกซ์	40
สรุปประเด็นสำคัญของบท	42
คำถามท้ายบท	43
บทที่ 4 แบบจำลองอิมพีแดนซ์	45
4.1 แนวคิดพื้นฐานของแบบจำลองอิมพีแดนซ์.....	45

4.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์เมทริกซ์	47
4.3 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อิมพีแดนซ์เมทริกซ์	56
สรุปประเด็นสำคัญของบท	60
คำถามท้ายบท	60
บทที่ 5 การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า	63
5.1 แนวคิดพื้นฐานในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า	63
5.2 หลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	67
5.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีเกาส์-เซเดล	72
5.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	84
5.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล	96
สรุปประเด็นสำคัญของบท	110
คำถามท้ายบท	110
บทที่ 6 การควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้า	113
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังไฟฟ้า	113
6.2 การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	114
6.3 การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง	118
6.4 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้	120
สรุปประเด็นสำคัญของบท	121
คำถามท้ายบท	121
บทที่ 7 การศึกษาความผิดปกติแบบสมมาตร	123
7.1 แนวคิดการศึกษาความผิดปกติแบบสมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง	123
7.2 หลักการวิเคราะห์ความผิดปกติแบบสมมาตร	126
7.3 การวิเคราะห์ความผิดปกติแบบสมมาตรโดยใช้อิมพีแดนซ์เมทริกซ์	131
7.4 พิกัดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า	135
สรุปประเด็นสำคัญของบท	136
คำถามท้ายบท	137
บทที่ 8 องค์ประกอบสมมาตร	141
8.1 แนวคิดพื้นฐานขององค์ประกอบสมมาตร	141
8.2 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุล	142
8.3 วงจรลำดับของอุปกรณ์ไฟฟ้า	143
8.4 วงจรลำดับของโครงข่าย	150
สรุปประเด็นสำคัญของบท	151

คำถามท้ายบท	152
บทที่ 9 การศึกษาความผิดปกติของระบบไม่สมมาตร	155
9.1 แนวคิดพื้นฐานในการศึกษาความผิดปกติของระบบไม่สมมาตร	155
9.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบสายเดียวลงดิน	159
9.3 การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบสายขนสาย	161
9.4 การวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบสายขนสายลงดิน	163
9.5 ข้อพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบไม่สมมาตร	166
สรุปประเด็นสำคัญของบท	169
คำถามท้ายบท	170
บทที่ 10 การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด	173
10.1 แนวคิดการจัดสรรกำลังการผลิตในระบบส่งจ่าย	173
10.2 สมการค่าเชื้อเพลิงและอัตราค่าเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า	176
10.3 การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัดภายในโรงไฟฟ้า	178
10.4 การจัดสรรกำลังการผลิตระหว่างโรงไฟฟ้า	185
สรุปประเด็นสำคัญของบท	191
คำถามท้ายบท	192
บทที่ 11 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	195
11.1 แนวคิดในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	195
11.2 หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะชั่วคราว	198
11.3 มุมโรเตอร์และสมการการแกว่งของมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	199
11.4 สมการความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและมุมกำลัง	204
11.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยพิจารณาเงื่อนไขเกณฑ์พื้นที่เท่ากัน	211
11.6 การพิจารณาเสถียรภาพของระบบหลายเครื่องจักร	220
สรุปประเด็นสำคัญของบท	222
คำถามท้ายบท	223
บทที่ 12 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง	225
12.1 หัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูงที่น่าสนใจ	225
12.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด	227
12.3 การประมาณสถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง	231
สรุปประเด็นสำคัญของบท	237
คำถามท้ายบท	238
บรรณานุกรม	239

ภาคผนวก – โค้ดโปรแกรมแมทแลบ	241
ดรรชนี	259
ประวัติผู้ประพันธ์	261

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1-1 ความสัมพันธ์ของหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง	4
รูปที่ 1-2 แผนผังสายเดียวของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE	5
รูปที่ 1-3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส	7
รูปที่ 1-4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	7
รูปที่ 1-5 วงจรสมมูลของสายส่ง	8
รูปที่ 1-6 สัญญาณกระแสและแรงดันเทียบกับเวลา	9
รูปที่ 1-7 เฟสเซอร์ของกระแสและแรงดัน	9
รูปที่ 2-1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส	15
รูปที่ 2-2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส	16
รูปที่ 2-3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสกรณีลัดวงจรที่ชั่วต่อ	16
รูปที่ 2-4 วงจรสมมูลตามลำดับองค์ประกอบสมมาตรแบบต่อเฟส ของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส	17
รูปที่ 2-5 โรเตอร์ มุมโรเตอร์ และมุมกำลังของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส	17
รูปที่ 2-6 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	18
รูปที่ 2-7 วงจรสมมูลต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า	18
รูปที่ 2-8 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแท็ป (Tap-changing Transformer)	19
รูปที่ 2-9 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเลื่อนเฟส (Phase-Shifting Transformer)	19
รูปที่ 2-10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ 3 ขดลวด	19
รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลของสายส่งแบบพารามิเตอร์กระจาย	20
รูปที่ 2-12 แบบจำลองสองทาง (Two-port model) และเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน	21
รูปที่ 2-13 การแบ่งส่วนของแบบจำลองสองทาง และเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน	21
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน ความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน ของโหลดแบบกำลังไฟฟ้าคงที่	23
รูปที่ 2-15 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน ความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน ของโหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่	23
รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน ความสัมพันธ์กระแสและแรงดัน ของโหลดแบบกระแสไฟฟ้าคงที่	23
รูปที่ 3-1 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง	26
รูปที่ 3-2 โครงข่ายวงจรไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์แบบโหนด	26
รูปที่ 3-3 บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง	28
รูปที่ 3-4 แบบจำลองอิมพีแดนซ์สำหรับคู่บรานซ์ที่เกิดความเหนี่ยวนำร่วม	33
รูปที่ 3-5 แบบจำลองแอดมิตแตนซ์สำหรับคู่บรานซ์ที่เกิดความเหนี่ยวนำร่วม	33
รูปที่ 3-6 เมทริกซ์ประจําบรานซ์สำหรับคู่บรานซ์ที่เกิดความเหนี่ยวนำร่วม	34
รูปที่ 3-7 บรานซ์เสมือนที่เกิดจากแอดมิตแตนซ์ร่วมของคู่บรานซ์ใด ๆ	37
รูปที่ 3-8 บรานซ์เสมือนที่เกิดจากแอดมิตแตนซ์ร่วมของคู่บรานซ์ใด ๆ กรณีบัส n กับบัส q เป็นบัสเดียวกัน	38
รูปที่ 4-1 วงจรไฟฟ้า 4 โหนด	45
รูปที่ 4-2 วงจรสมมูลเทวินิน เมื่อพิจารณาเฉพาะโหนดที่ k	46
รูปที่ 4-3 การเพิ่มบรานซ์รูปแบบที่ 1 และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่ถูกปรับปรุงแล้ว	48
รูปที่ 4-4 การเพิ่มบรานซ์รูปแบบที่ 2 และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่ถูกปรับปรุงแล้ว	49
รูปที่ 4-5 การเพิ่มบรานซ์รูปแบบที่ 3 และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่ถูกปรับปรุงแล้ว	49

รูปที่ 4-6 การเพิ่มบรานซ์รูปแบบที่ 4 และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่ถูกปรับปรุงแล้ว	51
รูปที่ 4-7 การเพิ่มบรานซ์เหนี่ยวนำร่วม จากบัสใหม่ (q) ไปยังบัสเดิม (p) และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่	54
รูปที่ 4-8 การเพิ่มบรานซ์เหนี่ยวนำร่วม จากบัสใหม่ (q) ไปยังบัสเดิม (p) และอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่	55
รูปที่ 4-9 วงจรสมมูลเทวินิน สำหรับการการเปลี่ยนแปลงเฉพาะตำแหน่ง	56
รูปที่ 4-10 วงจรสมมูลเทวินินเมื่อพิจารณาการลัดวงจร และการต่อบรานซ์ระหว่างบัส j และ k	58
รูปที่ 5-1 การวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	63
รูปที่ 5-2 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย	65
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิต ขนาดแรงดันและมุมเฟสที่ตำแหน่งโหลด เทียบกับกำลังโหลดที่เพิ่มขึ้น	66
รูปที่ 5-4 ระบบไฟฟ้ากำลังในมุมมองของการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้า	67
รูปที่ 5-5 นิยามของตัวแปรสำหรับการคำนวณ	68
รูปที่ 5-6 วงจรสมมูลแบบพาย	71
รูปที่ 5-7 การเข้าสู่คำตอบของตัวอย่างที่ 5.1	72
รูปที่ 5-8 ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 บัส	76
รูปที่ 5-9 สรุปผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 5.4	78
รูปที่ 5-10 ผลลัพธ์การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับตัวอย่างที่ 5.6	80
รูปที่ 5-11 เส้นโค้ง $y = f(x)$	84
รูปที่ 5-12 การเข้าสู่คำตอบของตัวอย่างที่ 5.8	85
รูปที่ 5-13 การเข้าสู่คำตอบของตัวอย่างที่ 5.9	88
รูปที่ 5-14 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังเทียบกับจำนวนรอบ	109
รูปที่ 6-1 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดในระบบ	113
รูปที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า	114
รูปที่ 6-3 ระบบส่งจ่ายอย่างง่าย 2 บัส โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสต้นทางและมีโหลดที่บัสปลายทาง	115
รูปที่ 6-4 การส่งจ่ายในระบบที่มีหม้อแปลงเปลี่ยนแท็บได้	115
รูปที่ 6-5 การชดเชยแบบขนานและวงจรสมมูลที่บัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบขนาน	116
รูปที่ 6-6 การชดเชยสายส่งแบบอนุกรมด้วยตัวเก็บประจุ	117
รูปที่ 6-7 การชดเชยสายส่งแบบอนุกรมด้วยตัวเก็บประจุ	117
รูปที่ 6-8 เฟสเซอร์แรงดันกรณีโหลดเบาบาง (0.5SIL)	117
รูปที่ 6-9 เฟสเซอร์แรงดันกรณีโหลดสูง (2SIL)	117
รูปที่ 6-10 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบตัวอย่าง	118
รูปที่ 6-11 การปรับเปลี่ยนการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการปรับกำลังการผลิตไฟฟ้าและการขยายระบบส่ง	118
รูปที่ 6-12 การปรับการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมมุมเฟสแรงดัน	119
รูปที่ 6-13 การปรับการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการปรับค่าอิมพีแดนซ์	119
รูปที่ 6-14 ตัวอย่างอุปกรณ์ชดเชยแบบขนาน	120
รูปที่ 6-15 ตัวอย่างอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรม	120
รูปที่ 6-16 ตัวอย่างอุปกรณ์ชดเชยแบบผสม	121
รูปที่ 7-1 วงจร R-L แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ	124
รูปที่ 7-2 กระแสลัดวงจรในวงจร R-L ในกรณีมีและไม่มีผลจากองค์ประกอบกระแสตรง	124
รูปที่ 7-3 กระแสผิดพลาดของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส	125
รูปที่ 7-4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส	125
รูปที่ 7-5 ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายขนาด 2 บัส และเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งโหลด	126

รูปที่ 7-6 วงจรสมมูลของระบบก่อนและหลังเกิดการลัดวงจร	126
รูปที่ 7-7 ระบบที่มีโหลดมอเตอร์และเกิดความผิดพลาด	127
รูปที่ 7-8 วงจรสมมูลของระบบที่มีโหลดมอเตอร์เมื่อเกิดความผิดพลาด	127
รูปที่ 7-9 วงจรสมมูลขณะเกิดความผิดพลาด	128
รูปที่ 7-10 การแยกวงจรสมมูลออกเป็นวงจรย่อยโดยใช้ทฤษฎีซ้อนทับ	128
รูปที่ 7-11 พิจารณาวงจรสมมูลที่ 2 โดยใช้หลักการวงจรสมมูลแบบเทวินิน	129
รูปที่ 7-12 ระบบไฟฟ้าขนาด 4 บัส	131
รูปที่ 7-13 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างขณะเกิดความผิดพลาดที่บัส 2	131
รูปที่ 7-14 วงจรสมมูลเทวินินเมื่อเกิดลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่บัส k	133
รูปที่ 7.15 ระบบสายป้อนของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งเชื่อมต่อกับระบบกริด	135
รูปที่ 8-1 ระบบสามเฟสแบบสมดุล	141
รูปที่ 8-2 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ 3 เฟส	142
รูปที่ 8-3 การรวมองค์ประกอบสมมาตร	142
รูปที่ 8-4 ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างง่าย	144
รูปที่ 8-5 วงจรสมมูลลำดับของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง	144
รูปที่ 8-6 วงจรสมมูลตามลำดับสำหรับโหลดต่อแบบวาย	145
รูปที่ 8-7 วงจรสมมูลลำดับศูนย์กรณีไม่ต่อจุดนิวทรัลลงดิน	145
รูปที่ 8-8 วงจรสมมูลลำดับสำหรับโหลดแบบเดลต้า	146
รูปที่ 8-9 วงจรสมมูลของระบบสายส่ง 3 เฟส	146
รูปที่ 8-10 วงจรสมมูลลำดับของสายส่งและสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันองค์ประกอบสมมาตร	146
รูปที่ 8-11 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	147
รูปที่ 8-12 วงจรสมมูลลำดับต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	147
รูปที่ 9-1 ความผิดพลาดไม่สมมาตรแบบขนาน	156
รูปที่ 9-2 ความผิดพลาดไม่สมมาตรแบบอนุกรม	156
รูปที่ 9-3 วงจรสมมูลลำดับต่อเฟส เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งบัส k ซึ่งเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตร	157
รูปที่ 9-4 ระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส	157
รูปที่ 9-5 วงจรลำดับของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 4 บัส	158
รูปที่ 9-6 ความผิดพลาดแบบสายเดียวลงดินที่เฟส a	159
รูปที่ 9-7 วงจรสมมูลในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสายเดียวลงดิน	159
รูปที่ 9-8 ความผิดพลาดแบบสายขนานระหว่างเฟส b และเฟส c	161
รูปที่ 9-9 วงจรสมมูลลำดับในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสายขนาน	161
รูปที่ 9-10 สายส่งกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสายขนานลงดิน ระหว่างเฟส b กับเฟส c	163
รูปที่ 9-11 วงจรสมมูลลำดับในกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสายขนานลงดิน	163
รูปที่ 10-1 ตัวอย่างการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากเส้นโค้งข้อมูลโหลด	174
รูปที่ 10-2 สัดส่วนของโหลดและประเภทโรงไฟฟ้าสำหรับการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับช่วงเวลาของโหลด	174
รูปที่ 10-3 เส้นโค้งอินพุต-เอาต์พุต ของหน่วยการผลิตไฟฟ้าแบบพลังงานความร้อน	176
รูปที่ 10-4 ราคาเชื้อเพลิง และ อัตราค่าเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยการผลิตไฟฟ้า	177
รูปที่ 10-5 โรงไฟฟ้าที่มีหน่วยการผลิต 2 หน่วย	178
รูปที่ 10-6 อัตราค่าเชื้อเพลิงของหน่วยการผลิต ในช่วงกำลังการผลิตที่ผลิตได้	179
รูปที่ 10-7 อัตราค่าเชื้อเพลิงของหน่วยการผลิต ในช่วงกำลังการผลิตที่ผลิตได้	182

รูปที่ 10-8 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยโรงไฟฟ้า 2 แห่ง	185
รูปที่ 11-1 การเปรียบเทียบระบบที่มีเสถียรภาพ และระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ	196
รูปที่ 11-2 ความสัมพันธ์ของเสถียรภาพ ความมั่นคง และความเชื่อถือได้	196
รูปที่ 11-3 การแบ่งประเภทของการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	197
รูปที่ 11-4 เส้นโค้งกำลัง-มุมและเส้นโค้งสวิง	198
รูปที่ 11-5 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบขั้วยื่น	199
รูปที่ 11-6 มุมโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิงคงที่	199
รูปที่ 11-7 มุมโรเตอร์เทียบกับแกนอ้างอิงหมุน	200
รูปที่ 11-8 วงจรสมมูลด้านขดลวดอาร์เมเจอร์และเฟสเซอร์ไดอะแกรม	200
รูปที่ 11-9 มุมโรเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้า	200
รูปที่ 11-10 โรเตอร์, วงจรสมมูลอาร์เมเจอร์ และมุมโรเตอร์เทียบแกน a-axis	201
รูปที่ 11-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ_m และ δ_m	202
รูปที่ 11-12 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างง่ายและเส้นโค้งกำลัง-มุม	204
รูปที่ 11-13 มุมกำลังในสภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด	204
รูปที่ 11-14 วงจรสมมูลด้านอาร์เมเจอร์และเฟสเซอร์ไดอะแกรม	204
รูปที่ 11-15 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย	205
รูปที่ 11-16 เครื่องจักรไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย	205
รูปที่ 11-17 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับตัวอย่างที่ 11.1	206
รูปที่ 11-18 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของระบบตัวอย่างที่ 11.1	206
รูปที่ 11-19 เส้นโค้งกำลัง-มุม สำหรับตัวอย่างที่ 11.1	207
รูปที่ 11-20 วงจรสมมูลขณะเกิดลัดวงจร สำหรับตัวอย่างที่ 11.2	207
รูปที่ 11-21 เส้นโค้งกำลัง-มุมสำหรับตัวอย่างที่ 11.2	208
รูปที่ 11-22 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์สำหรับตัวอย่างที่ 11.2	208
รูปที่ 11-23 วงจรสมมูลกรณีสายส่งถูกปลด	209
รูปที่ 11-24 เส้นโค้งกำลัง-มุมสำหรับตัวอย่างที่ 11.3	209
รูปที่ 11-25 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์สำหรับตัวอย่างที่ 11.3	209
รูปที่ 11-26 เส้นโค้งกำลัง-มุม กรณีตัวอย่าง 11.1 – 11.3	210
รูปที่ 11-27 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์สำหรับตัวอย่างที่ 11.1-11.3	210
รูปที่ 11-28 ระบบเครื่องจักรเดียวและบัสบาร์และเส้นโค้งกำลัง-มุม	211
รูปที่ 11-29 ความเร็วโรเตอร์ และมุมโรเตอร์เทียบจุดทำงานบนเส้นโค้งกำลัง-มุม	212
รูปที่ 11-30 ระบบอย่างง่ายและเส้นโค้งกำลัง-มุม สำหรับกรณีที่ 2	213
รูปที่ 11-31 การพิจารณามุมวิกฤติ	214
รูปที่ 11-32 ระบบอย่างง่ายสำหรับการพิจารณากรณีที่ 3	215
รูปที่ 11-33 เส้นโค้งกำลัง-มุมในสภาวะต่าง ๆ และจุดทำงาน	216
รูปที่ 11-34 เส้นโค้งกำลัง-มุมในสภาวะต่าง ๆ และจุดทำงาน	216
รูปที่ 11-35 ระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่าง 11.4	217
รูปที่ 11-36 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วโรเตอร์ เมื่อจำกัดความผิดพลาดที่เวลา 0.06 วินาที และ 0.25 วินาที	218
รูปที่ 11-37 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ สำหรับตัวอย่าง 11.5	219
รูปที่ 11-38 ตัวอย่างระบบที่มีหลายเครื่องจักร และลักษณะการแกว่งของมุมโรเตอร์	220
รูปที่ 11-39 ระบบไฟฟ้าหลายเครื่องจักรสำหรับตัวอย่างที่ 11.6	221

รูปที่ 11-40 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ เมื่อจำกัดความผิดพลาดที่เวลา 0.06 วินาที	221
รูปที่ 11-41 การเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ จำกัดความผิดพลาดที่เวลา 0.23 วินาที	222
รูปที่ 12-1 แผนภาพแสดงหลักการประมาณสถานะ	232
รูปที่ 12-2 แบบจำลองเซอร์กิตเบรกเกอร์	235
รูปที่ 12-3 ข่ายวงจรตัวอย่าง แสดงรายละเอียดกลุ่มบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้า.....	236

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	รูปแบบปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและประเด็นการวิเคราะห์	14
ตารางที่ 2-2	วงจรสมมูลของสายส่งแบบพหุขั้วและแบบจำลองสองทาง.....	22
ตารางที่ 3-1	แบบจำลองอิมพีแดนซ์และแบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้า	28
ตารางที่ 3-2	เมทริกซ์ที่ใช้ในการปรับปรุงแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงข่าย	39
ตารางที่ 5-1	ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโหลดกำลังไฟฟ้า	68
ตารางที่ 5-2	รูปแบบสมการกำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่งบัส	69
ตารางที่ 5-3	ชนิดของบัสและเงื่อนไขการคำนวณ.....	70
ตารางที่ 5-4	สมการสำหรับการคำนวณสมาชิกของเมทริกซ์จาโคเบียน (H)	89
ตารางที่ 5-5	เปรียบเทียบเวลา และจำนวนรอบในการคำนวณ จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีต่าง ๆ	109
ตารางที่ 8-1	วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลง	148
ตารางที่ 9-1	กระแสมัดพร้อมสำหรับความผิดพร้อมรูปแบบต่าง ๆ	166
ตารางที่ 10-1	อัตราความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ	177
ตารางที่ 12-1	ตัวอย่างหัวข้อการวิเคราะห์ขั้นสูงและหัวข้อการวิเคราะห์พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	226
ตารางที่ 12-2	หัวข้อการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรกำลังการผลิตในระบบส่งจ่าย	227
ตารางที่ 12-3	รูปแบบการพิจารณาปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด.....	230

บทที่ 1 พื้นฐานการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

- ภาพรวมและความสำคัญของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
- ข้อกำหนดพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
- ระบบต่อหน่วย (Per-Unit System)
- สรุปประเด็นสำคัญของบท
- คำถามท้ายบท

1.1 ภาพรวมและความสำคัญของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลัง ในสถานะต่าง ๆ ทั้งสถานะปกติ และสถานะผิดปกติ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ระบบ จะถูกนำไปใช้พิจารณาในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังใหม่ ขยายหรือปรับปรุงระบบที่มีอยู่เดิมให้ดีขึ้น รวมถึงการหาแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้อง หัวข้อในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง มีหลากหลายหัวข้อขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขสถานะที่กำลังพิจารณา ตัวอย่างหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น

- การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis)
- การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow)
- การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic Dispatch)
- การวางแผนการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Unit Commitment)
- การวิเคราะห์ความผิดปกติแบบลัดวงจร (Short-Circuit Fault Analysis)
- การวิเคราะห์สถานะฉุกเฉินของระบบ (Contingency Analysis)
- การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (Power System Stability)
- การประมาณสถานะของระบบ (State Estimation)

ในตำราเล่มนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในบางหัวข้อเท่านั้น โดยจะแบ่งหัวข้อออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นฐาน และการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นฐานขั้นสูง

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นฐาน ในที่นี้หมายถึงหัวข้อการวิเคราะห์ที่นักศึกษาควรมีความรู้ความเข้าใจ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการวิเคราะห์ขั้นสูงต่อไป เป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาเฉพาะเงื่อนไขทางวิศวกรรม และใช้เทคนิคการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าขั้นพื้นฐานในการวิเคราะห์ได้ หัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นพื้นฐานที่จะกล่าวถึงมี 2 หัวข้อหลักดังนี้

(1) การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis)

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบส่งจ่ายในระยะเวลาใดเวลาหนึ่งที่กำลังไฟฟ้ามีการถ่ายเทจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้คือทราบปริมาณและทิศทางของการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของระบบทั้งหมด ระดับแรงดันทำงาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบ และข้อมูลอื่น ๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวบอกให้ทราบว่าระบบทำงานเป็นปกติหรือไม่อย่างไร จากผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ ออกแบบ

วางแผนระบบไฟฟ้า รวมถึงพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบในขั้นสูงต่อไป เช่น การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด การวิเคราะห์สถานะฉุกเฉินของระบบ การประมาณสถานะของระบบ เป็นต้น (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 5)

(2) การวิเคราะห์สถานะผิดปกติของแบบลัดวงจร (Short-Circuit Fault Analysis)

การวิเคราะห์สถานะผิดปกติของแบบลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นการคำนวณกระแส และแรงดันในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ขณะระบบเกิดความผิดปกติเมื่อการลัดวงจรของตัวนำไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่สำคัญของการวิเคราะห์สถานะผิดปกติคือ กระแสผิดปกติและแรงดันผิดปกติ ซึ่งจะนำไปใช้สำหรับการเลือกฟักัดของอุปกรณ์ป้องกัน การปรับตั้งรีเลย์ป้องกัน รวมถึงเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบในขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ เป็นต้น สถานะผิดปกติของแบบลัดวงจรสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ความผิดปกติแบบสมมาตรหรือการลัดวงจรแบบสามเฟส (Three Phase Fault) และความผิดปกติแบบไม่สมมาตร (ความผิดปกติแบบสายเดียวลงดิน (Single line to ground Fault) ความผิดปกติแบบสายขนสาย (Double lines Fault) และความผิดปกติแบบสายขนสายลงดิน (Double lines to ground Fault)) (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 7 และ 9)

หัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง ในที่นี้หมายถึง หัวข้อการวิเคราะห์ที่พิจารณาเงื่อนไขทางวิศวกรรมร่วมกับเงื่อนไขอื่น ๆ ต้องอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงช่วยในการวิเคราะห์ โดยทั่วไปการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง มักจะอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า และ/หรือการศึกษาสถานะลัดวงจร เพื่อใช้เป็นข้อมูลสถานะเริ่มต้น หรือควมมีความรู้ความเข้าใจการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังพื้นฐานมาก่อน สำหรับหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูงที่จะกล่าวถึงในตำราเล่มนี้ แบ่งเป็น 3 หัวข้อหลักดังนี้

(1) การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic Dispatch)

การวางแผนการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า นอกจากพิจารณาเงื่อนไขเชิงวิศวกรรมแล้วยังจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic Dispatch) ซึ่งเป็นการวางแผนกำหนดปริมาณกำลังผลิตเพื่อจ่ายโหลด และกำลังสูญเสียในระบบส่งจ่าย ให้เพียงพอในแต่ละช่วงเวลา ภายใต้เงื่อนไขต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด และไม่เกินขีดความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแบ่งการพิจารณาเป็นสองส่วนคือ การจัดสรรกำลังการผลิตภายในโรงจักร และการจัดสรรกำลังการผลิตระหว่างโรงจักร

ผลลัพธ์จากการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด จะบ่งบอกว่าโรงไฟฟ้าแต่ละแห่งและหน่วยการผลิตไฟฟ้าแต่ละหน่วย ควรผลิตกำลังไฟฟ้าปริมาณเท่าใดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง จะพิจารณาเงื่อนไขการควบคุมแรงดันและการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อลดความสูญเสียในระบบส่งจ่ายร่วมกับการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด จะเรียกว่า การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow) หลังจากการจัดสรรปริมาณกำลังการผลิตอย่างเหมาะสมแล้ว โดยทั่วไปโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องและทำงานโดยใช้ต้นกำลังชนิดต่าง ๆ กัน การกำหนดว่า จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดทำงานบ้างในช่วงเวลาใดบ้างนั้น เราจะเรียกว่า การกำหนดตารางการเดินเครื่อง (Unit Commitment)

สำหรับหัวข้อ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด และการกำหนดตารางการเดินเครื่อง จะไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในตำราเล่มนี้ โดยตำราเล่มนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเรื่อง การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด เท่านั้น (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 10)

(2) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability Analysis)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ ขณะถูกรบกวนและหลังจากกำจัดกรบกวน จากนั้นพิจารณาว่าหลังการกำจัดกรบกวนออกไปแล้วระบบสามารถกลับเข้าสู่จุดทำงานได้หรือไม่ เสถียรภาพของระบบ

ไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งการพิจารณาได้หลายประเภท ในการศึกษาขั้นต้นเราจะศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว (Transient Stability) ซึ่งเป็นการศึกษาเสถียรภาพของระบบเมื่อถูกรบกวนอย่างรุนแรง เช่น เกิดความผิดปกติของแบบลัดวงจร โดยการบ่งบอกเสถียรภาพของระบบจะพิจารณาจากมุมโรเตอร์ (Rotor Angle) หรือมุมกำลัง (Power Angle) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตามความสัมพันธ์ที่เรียกว่าสมการการแกว่งไกวของมุมโรเตอร์ หรือสมการสวิง (Swing Equation) (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 11)

(3) หัวข้อที่น่าสนใจในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขั้นสูง

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีด้านอื่น ๆ เข้ามาประกอบ เช่น เทคโนโลยีด้านการสื่อสาร ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสูง เป็นต้น ข้อดีของการบูรณาการเทคโนโลยีคือระบบส่งจ่ายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ส่งผลให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซับซ้อนมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงเข้ามาช่วยในการคำนวณ

นอกจากหัวข้อการจำลองการผลิตรูปแบบประหยัด และการวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว ที่จะกล่าวถึงรายละเอียดหลังจากหัวข้อการวิเคราะห์พื้นฐานแล้ว เพื่อให้เห็นภาพของการบูรณาการเทคโนโลยีในระบบไฟฟ้ากำลัง และการนำหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพื้นฐาน มาใช้ในการวิเคราะห์ขั้นสูง และในตำราเล่มนี้ได้เลือกหัวข้อที่น่าสนใจเพิ่มเติม และนำมากล่าวถึงรายละเอียดโดยสังเขปอีกจำนวน 2 หัวข้อ ประกอบด้วย

- การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด
- การประมาณสถานะในระบบไฟฟ้ากำลัง

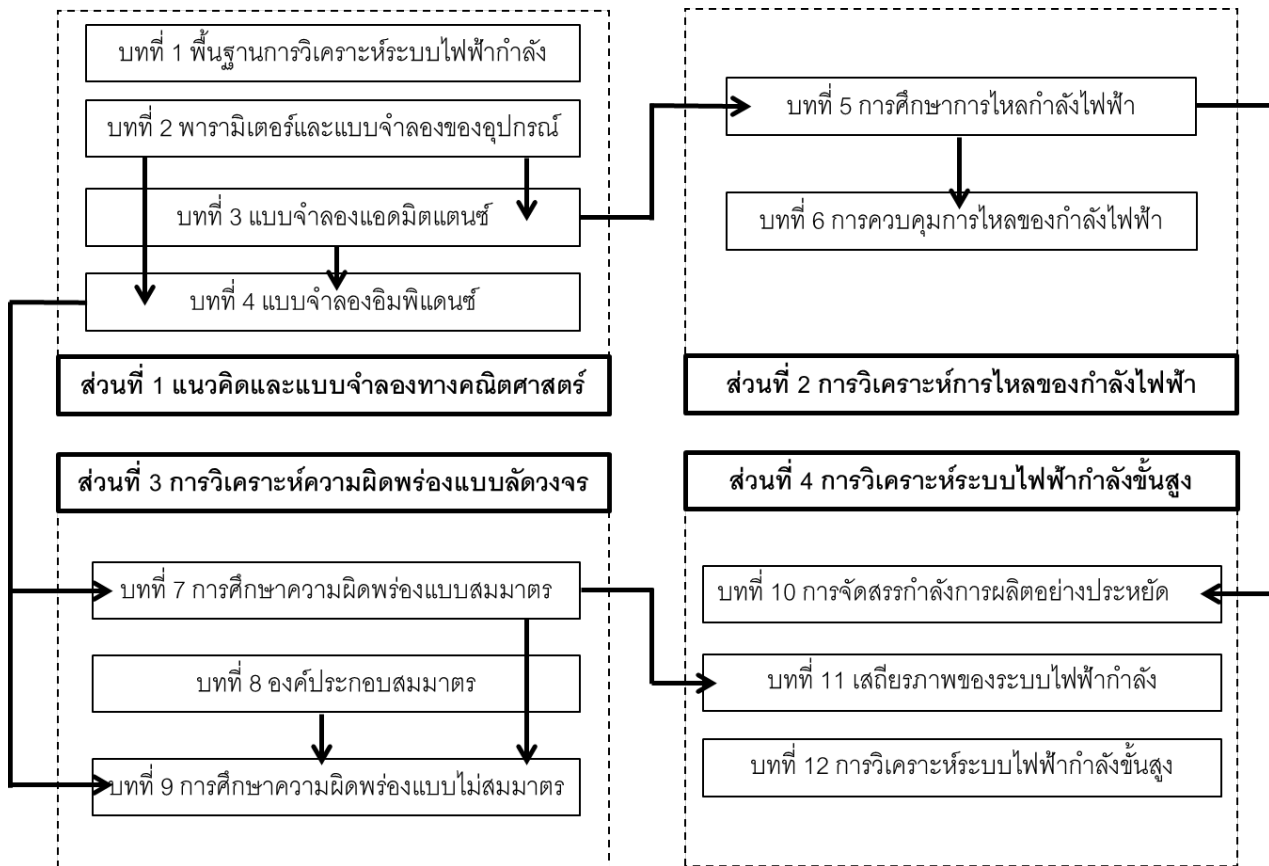
สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบโครงข่ายไฟฟ้ากำลังจะถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขการวิเคราะห์ จากนั้นเราสามารถนำหลักการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐานมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบได้ แบบจำลองที่นำมาใช้สำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้ากำลังแบ่งเป็น 2 รูปแบบได้แก่

(1) แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ (Admittance model) เป็นแบบจำลองที่พิจารณาจากวงจรสมมูลของระบบใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นแอดมิตแตนซ์ ซึ่งเมื่อใช้หลักการวิเคราะห์วงจรแบบโนด (Nodal Analysis) จะได้แบบจำลองแอดมิตแตนซ์ของระบบ เรียกว่า Node Admittance Matrix หรือ Bus Admittance Matrix นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 3)

(2) แบบจำลองอิมพีแดนซ์ (Impedance model) เป็นแบบจำลองที่พิจารณาจากวงจรสมมูลของระบบใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นอิมพีแดนซ์ ซึ่งเมื่อใช้หลักการวิเคราะห์วงจรแบบเมช (Mesh Analysis) จะได้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของระบบ เรียกว่า Impedance Matrix หรือ Bus Impedance Matrix นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจร (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 4)

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมมูล สามารถวิเคราะห์จากวงจรสมมูลต่อเฟสได้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์มีความสมมาตร แต่เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟสเกิดความไม่สมดุล เช่น อิมพีแดนซ์มีค่าไม่เท่ากันทุกเฟส เกิดการลัดวงจรแบบสายเดียวลงดิน เป็นต้น การวิเคราะห์วงจรสมมูลต่อเฟสไม่สามารถใช้ในกรณีนี้ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการแปลงทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Transformations) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งเทคนิคการแปลงที่นำมาแปลงเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลให้เป็นเฟสเซอร์ที่สมดุล เรียกว่า การแปลงองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component Transformation) (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 8) เมื่อเราได้เฟสเซอร์ที่สมดุลแล้ว จะสามารถใช้การวิเคราะห์จากวงจรสมมูลต่อเฟสในการคำนวณได้

ภาพรวมเนื้อหาของ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ที่จะกล่าวถึงในตำราเล่มนี้ สามารถแสดงเป็นแผนผังความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 ความสัมพันธ์ของหัวข้อการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

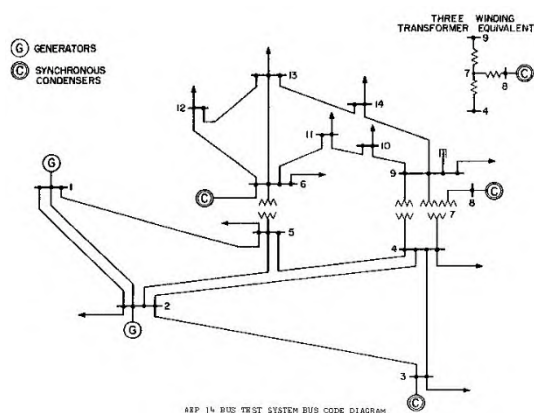
1.2 ข้อกำหนดพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.1 การแทนระบบไฟฟ้ากำลังด้วยรูปแบบต่าง ๆ (Representations of Power System)

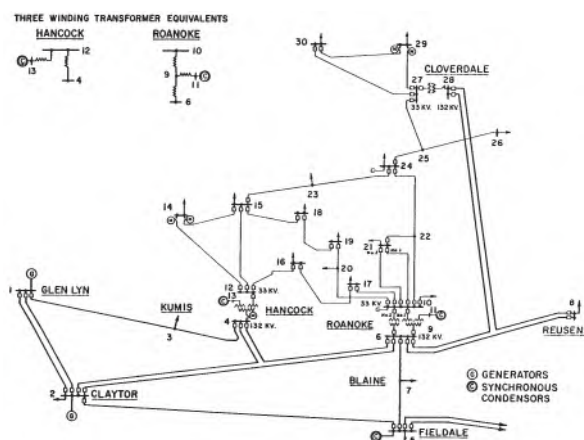
(1) แผนผังสายเดี่ยว (Single Line / One-line Diagram)

โดยทั่วไป ระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสจะถูกออกแบบให้รองรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างสมดุล หรือส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากันทุกเฟส เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในระบบจะถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันทั้ง 3 เฟส ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในเงื่อนไขที่สมดุล เราสามารถแทนระบบไฟฟ้ากำลังด้วยแผนผังอย่างง่ายที่แสดงรายละเอียดการเชื่อมต่อของระบบเพียงเฟสเดียวเรียกว่า แผนผังสายเดี่ยว

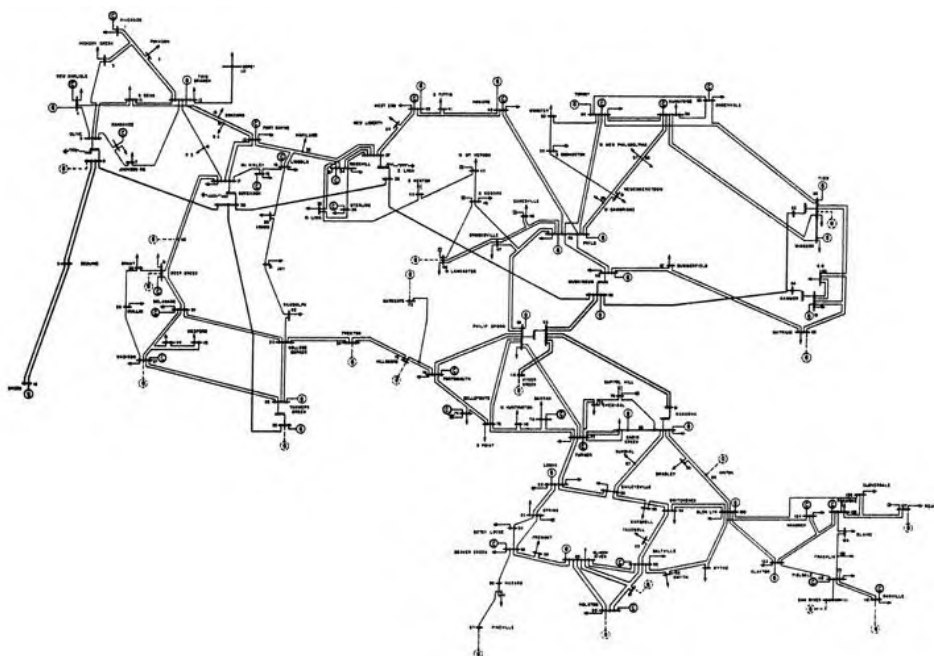
การใช้สัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแผนผังสายเดี่ยวจะถูกกำหนดภายใต้มาตรฐาน IEC หรือ ANSI/ IEEE เพื่อให้เกิดความเข้าใจตรงกัน



(ก) ระบบ IEEE 14 บัส



(ข) ระบบ IEEE 30 บัส



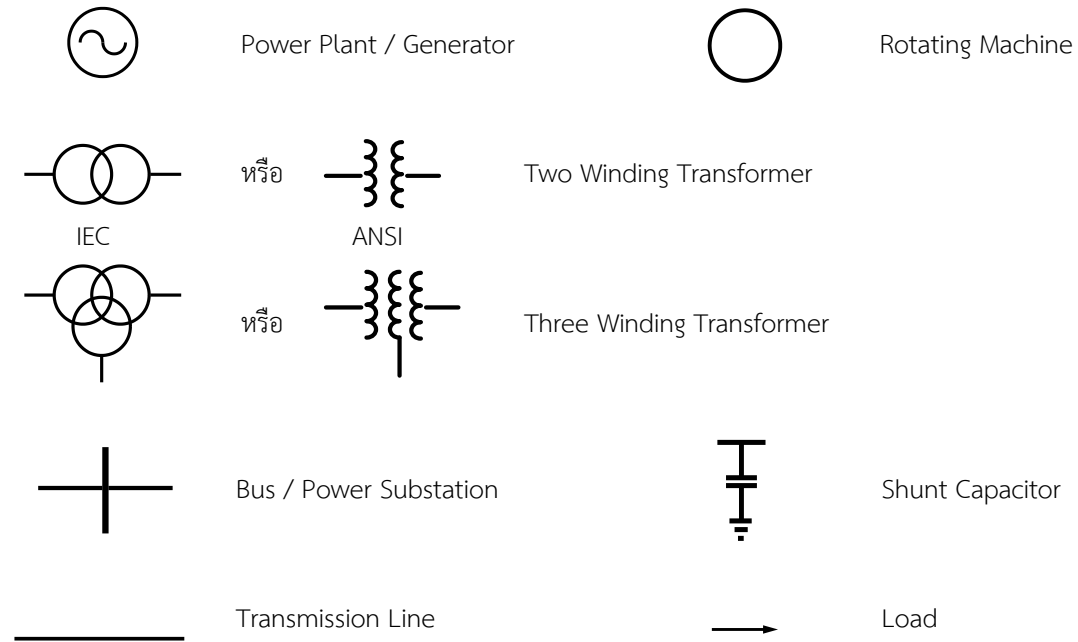
(ค) ระบบ IEEE 118 บัส

รูปที่ 1-2 แผนผังสายเดี่ยวของระบบไฟฟ้ากำลังมาตรฐาน IEEE¹

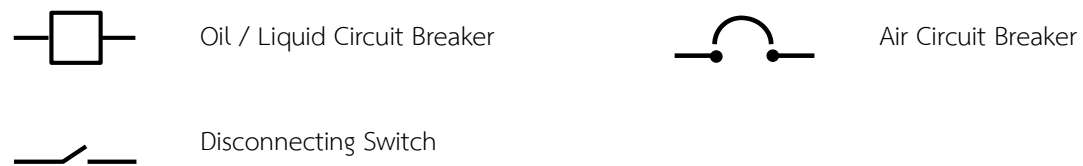
¹ <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>

(2) สัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Equipment Symbols)

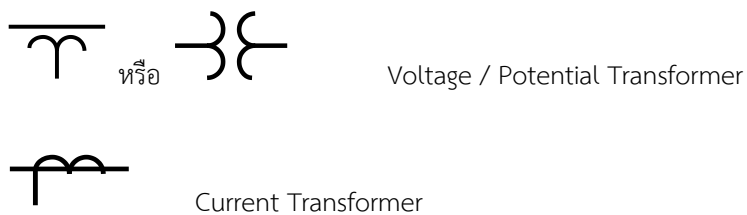
(2.1) อุปกรณ์หลัก (Main Power Equipment)



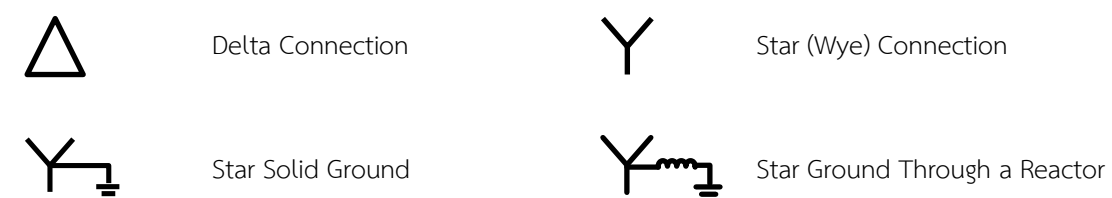
(2.2) อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Circuit Breaker and Switch)



(2.3) หม้อแปลงสำหรับการวัด (Instrument Transformer)



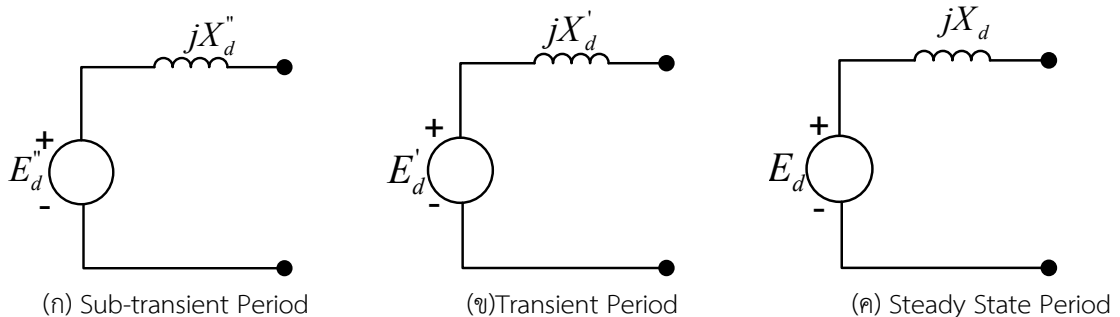
(2.4) รูปแบบการต่อขดลวด (Winding Connection)



(3) วงจรสมมูลของอุปกรณ์ในระบบ (Equivalent Circuit Models)

(3.1) เครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous Machine)

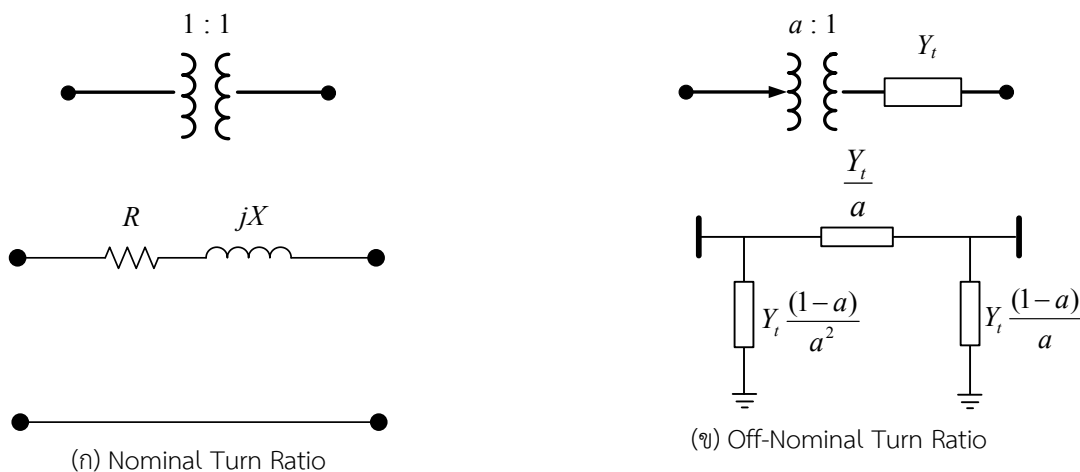
เครื่องจักรกลซิงโครนัสในระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งอยู่ในส่วนของระบบผลิตกำลังไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์ระบบเพื่อความสะดวกจะพิจารณาเครื่องจักรกลซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบทรงกระบอก วงจรสมมูลพื้นฐานแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์ แต่เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่พิจารณา ดังนั้นวงจรสมมูลจะถูกแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ สภาวะชั่วแวบ (Subtransient Period) สภาวะชั่วครู่ (Transient Period) และสภาวะคงตัว (Steady State Period)



รูปที่ 1-3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

(3.2) หม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer)

วงจรสมมูลสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยปกติจะแทนด้วยอิมพีแดนซ์ แต่สำหรับหม้อแปลงในระบบส่งจ่ายจะสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันได้หรือเปลี่ยนตำแหน่งแท็บได้ ในที่นี้เราจะพิจารณาหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (Two-Winding) วงจรสมมูลสามารถเขียนได้ 2 กรณีคือ กรณีที่มีตำแหน่งแท็บปกติ (Nominal Turn Ratio) วงจรสมมูลจะแทนด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม ส่วนกรณีที่มีตำแหน่งแท็บไม่ปกติ (Off-Nominal Turn Ratio) วงจรสมมูลจะแทนด้วยแบบจำลองพาย

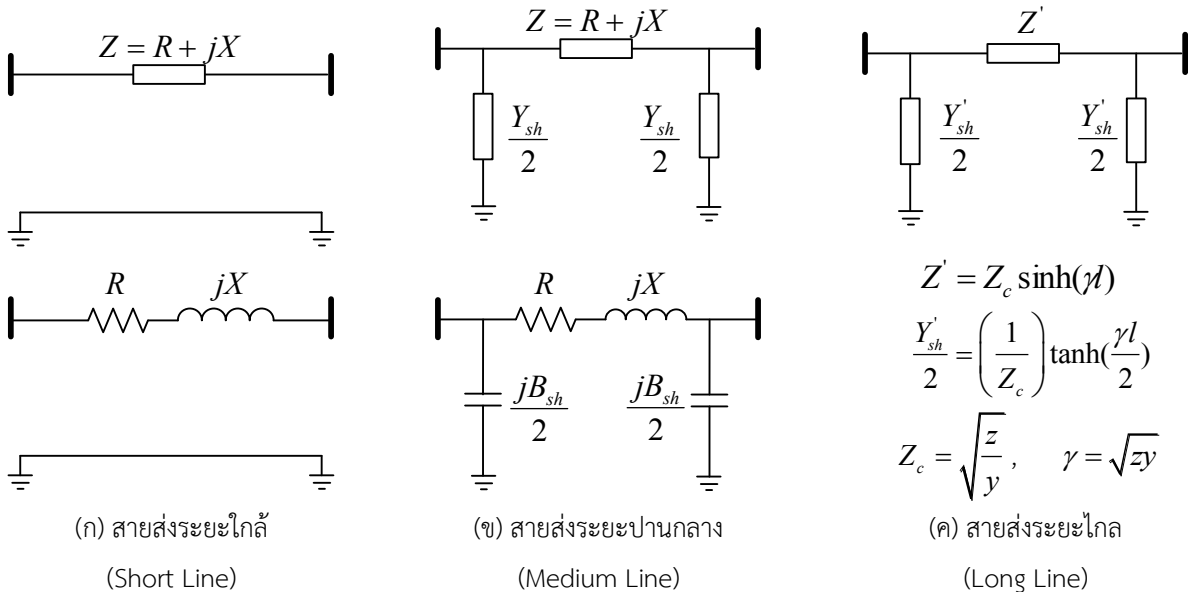


รูปที่ 1-4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

(3.3) สายส่ง (Transmission Line)

สายส่งกำลังไฟฟ้า แทนได้ด้วยวงจรสมมูลแบบพาย เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์อาจแบ่งสายส่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ สายส่งระยะสั้น สายส่งระยะปานกลาง และสายส่งระยะไกล

- ก) สายส่งระยะสั้น ค่า Shunt Admittance (Y_{sh}) มีค่าน้อยดังนั้นมักจะไม่นำมาพิจารณา
- ข) สายส่งระยะปานกลาง พิจารณาค่า Shunt Admittance (Y_{sh})
- ค) สายส่งระยะไกล ต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์ต่อความยาว (z) และแอตมิตแตนซ์ต่อความยาวของสายส่ง (y) นำมาคำนวณเป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูล (Z) และแอตมิตแตนซ์สมมูลของสายส่ง (Y_{sh})



รูปที่ 1-5 วงจรสมมูลของสายส่ง

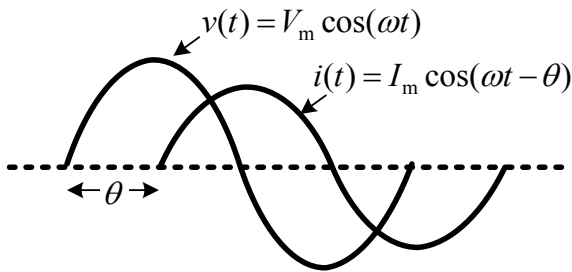
(3.4) โหลด (Load)

การพิจารณาวงจรสมมูลของโหลด หรือเงื่อนไขของโหลดสำหรับการวิเคราะห์ห้วงจร ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลด ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

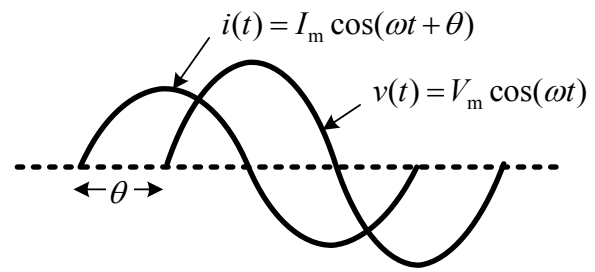
- ก. โหลดแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power Load) เช่น โหลดมอเตอร์ การวิเคราะห์จะพิจารณาเป็นค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ตามเงื่อนไขของอุปกรณ์ หรือพิจารณาพฤติกรรมของโหลดตามชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับหัวข้อที่ต้องการวิเคราะห์
- ข. โหลดแบบอิมพีแดนซ์คงที่ (Constant Impedance Load) เช่น โหลดประเภท Capacitors, Harmonic Filters และ MOVs (Motor Operated Valve) การวิเคราะห์จะพิจารณาเป็นค่าอิมพีแดนซ์
- ค. โหลดแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant Current Load) เช่น โหลดที่ใช้สำหรับการทดสอบ Battery discharge capacity และ UPS systems performance การวิเคราะห์จะพิจารณาเป็นค่ากระแสคงที่ตามเงื่อนไขของอุปกรณ์

1.2.2 เฟสเซอร์สำหรับปริมาณทางไฟฟ้า (Phasor Notation)

สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ของระบบคงที่ และทำงานในสภาวะคงตัว (Steady State) ค่าปริมาณทางไฟฟ้า (ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า) จะถูกแทนด้วยเวกเตอร์ 2 มิติ หรือจำนวนเชิงซ้อนเรียกว่า เฟสเซอร์ (Phasor) โดยขนาดของเวกเตอร์คือค่าประสิทธิผล (Root-Mean-Square : RMS) และมุมของเวกเตอร์คือค่ามุมต่างเฟสเทียบกับสัญญาณอ้างอิง



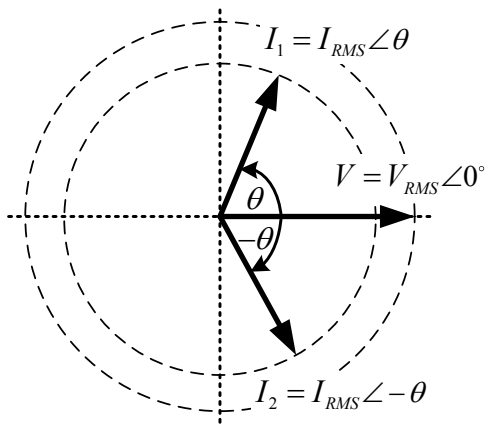
(ก) กระแสไฟฟ้าหลังแรงดัน



(ข) กระแสไฟฟ้าหน้าแรงดัน

รูปที่ 1-6 สัญญาณกระแสและแรงดันเทียบกับเวลา

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะคงตัว เราจะแทนกระแสและแรงดันในรูปเฟสเซอร์ โดยเลือกให้เฟสเซอร์ค่าใดค่าหนึ่งเป็นเฟสเซอร์อ้างอิงเพื่อกำหนดมุมของเฟสเซอร์ที่เหลือ ตัวอย่างการเขียนเฟสเซอร์แสดงในรูปที่ 1-7



รูปที่ 1-7 เฟสเซอร์ของกระแสและแรงดัน

สัญญาณในรูปฟังก์ชันทางเวลา (Instantaneous Value) อยู่ในรูปแบบดังนี้ :

แรงดันอ้างอิง	$v(t) = V_m \cos(\omega t)$
กระแสไฟฟ้าหน้า	$i_1(t) = I_m \cos(\omega t + \theta)$
กระแสไฟฟ้าหลัง	$i_2(t) = I_m \cos(\omega t - \theta)$

เฟสเซอร์ของสัญญาณ เขียนแทนได้ดังนี้:

แรงดันอ้างอิง	$V = V_{rms} \angle 0^\circ$
กระแสไฟฟ้าหน้า	$I_1 = I_{rms} \angle \theta$
กระแสไฟฟ้าหลัง	$I_2 = I_{rms} \angle -\theta$

นิยามและที่มาของเฟสเซอร์ ปริมาณเฟสเซอร์มีที่มาจากการพิจารณา Euler's Identity ดังนี้

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad \rightarrow \quad \cos \theta = \operatorname{Re}\{e^{j\theta}\} \text{ และ } \sin \theta = \operatorname{Im}\{e^{j\theta}\}$$

แรงดันไฟฟ้าขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Voltage) เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_1) = \operatorname{Re}\{V_m e^{j(\omega t + \theta_1)}\} = \operatorname{Re}\{V_{rms} e^{j\theta_1} (\sqrt{2} e^{j\omega t})\}$$

เมื่อพิจารณาระบบที่มีความถี่ที่เราสามารถจะทิ้งพจน์ $\sqrt{2} e^{j\omega t}$ ดังนั้นแรงดันจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_1) \equiv V_{rms} e^{j\theta_1}$$

นิยามเฟสเซอร์แรงดันได้ดังนี้

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_1} = |V_{rms}| \angle \theta_1 \text{ หรือ } V = |V_{rms}| (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1)$$

ในทำนองเดียวกัน นิยามเฟสเซอร์กระแส $i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_2) = I_m e^{j\theta_2}$ ได้ดังนี้

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta_2} = |I_{rms}| \angle \theta_2 \text{ หรือ } I = |I_{rms}| (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2)$$

1.3 ระบบต่อหน่วย

ระบบไฟฟ้าส่งจ่ายกำลังโดยทั่วไป จะประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งอัตราส่วนการแปลงแรงดัน การต่อขดลวดของหม้อแปลง จะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์วงจรเปลี่ยนแปลงไป เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ จึงมีการนำ ระบบต่อหน่วย (Per-Unit System) มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งเป็นรูปแบบการคำนวณโดยไม่ต้องคำนึงถึงหน่วย โดยทำการเปลี่ยนปริมาณทั้งหมดเป็น เปอร์เซ็นต์ หรือเป็นสัดส่วนของค่าฐานที่กำหนดขึ้น ข้อดีของการใช้ระบบต่อหน่วย มีหลายประการได้แก่

- ลดข้อผิดพลาดในการระบุหน่วยของปริมาณ เนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงหน่วย ขณะทำการคำนวณ
- ลดความยุ่งยากในการคำนวณระบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากอัตราส่วนและรูปแบบการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีผลต่อการคำนวณในระบบต่อหน่วย
- พิจารณาเปรียบเทียบค่าปริมาณทางไฟฟ้าของระบบได้ง่ายขึ้น

การคำนวณในระบบต่อหน่วย มีขั้นตอนดังนี้

- (1) กำหนดค่าฐานสำหรับปริมาณแต่ละประเภท
- (2) คำนวณค่าต่อหน่วยของพารามิเตอร์และปริมาณที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
- (3) วิเคราะห์วงจร
- (4) แปลงค่าต่อหน่วยกลับมาเป็นค่าในหน่วยปกติ

1.3.1 การกำหนดค่าฐาน (Base Values)

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับ ค่าฐาน 4 ค่าได้แก่ ค่าฐานของกำลังปรากฏ (S_{base}) ค่าฐานของแรงดัน (V_{base}) ค่าฐานของอิมพีแดนซ์ (Z_{base}) และค่าฐานของกระแส (I_{base}) เนื่องจากค่าฐานทั้ง 4 มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นในการกำหนดค่าฐานสามารถกำหนดได้เพียง 2 ค่า เท่านั้น ส่วนค่าฐานที่เหลือจะได้ออกมาจากการนำค่าฐานที่กำหนดไว้แล้วมาคำนวณ ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 3 เฟส โดยทั่วไปนิยมกำหนดค่าฐานดังนี้

- ค่าฐานที่กำหนดขึ้น โดยทั่วไปนิยมกำหนดค่า ค่าฐานกำลังปรากฏ และค่าฐานแรงดัน

ค่า S_{base} กำหนดเป็นค่ากำลังไฟฟ้า 3 เฟส อาจกำหนดจากพิกัดอุปกรณ์ หรือกำหนดค่าเป็น 100 MVA, 1000 MVA ขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของระบบ โดยค่า S_{base} ของระบบมีได้ค่าเดียวเท่านั้น

ค่า V_{base} กำหนดเป็นแรงดันระหว่างสาย (Line to line voltage) โดยปกติเราจะเลือกระดับแรงดันปกติของระบบหรือแรงดันพิกัดของหม้อแปลง เช่น ระบบสายส่ง 230 kV เลือกค่าฐานเป็น 230 kV โดยค่า V_{base} ของระบบมีได้หลายค่า เช่น ระบบมีหม้อแปลง 115 kV / 22 kV จะได้ค่า V_{base} ด้านแรงสูงมีค่า 115 และค่า V_{base} ด้านแรงต่ำมีค่า 22 kV

- ค่าฐานที่ได้จากการคำนวณ เมื่อกำหนดค่าฐาน 2 ค่าแล้ว ค่าฐานที่เหลือคือ ค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Z_{base}) และค่าฐานกระแส (I_{base}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{(\sqrt{3})V_{base}} \quad \text{และ} \quad Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

1.3.2 การคำนวณค่าต่อหน่วย (Per-Unit Calculations)

หลังจากกำหนดค่าฐานแล้ว ทำการแปลงค่าพารามิเตอร์ หรือปริมาณที่เกี่ยวข้องให้เป็นค่าต่อหน่วย โดยการนำค่าปริมาณในหน่วยปกติหารด้วยค่าฐาน ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\text{PER UNIT VALUE} = \frac{\text{ACTUAL VALUE}}{\text{BASE VALUE}}$$