

การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส  
A Study the Effects Power Quality on Induction Motor's Performance

โดย

นายกิตติธัช	ฮาวน้อย
นายเทพพร	อาจละอ
นายธนະสิทธิ์	แสงประยูร
นายนิติพร	รักษายศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส  
A Study the Effects Power Quality on Induction Motor's Performance

โดย

นาย กิตติชัย	ฮวบน้อย
นาย เทพพร	อาจละออ
นาย ณะสิทธิ์	แสงประยูร
นาย นิธิพร	รักษายศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

# A Study the Effects Power Quality on Induction Motor's Performance

KITTITHAT HUAPNOI  
TAPPRON ARTRAOR  
TANASIT SANGPRAYOON  
NITHIPORN RUKSAYOD

A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMWNNT FOR  
THE DEGREE OF BECHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส  
A Study the Effects Power Quality on Induction Motor's Performance

โดย

นาย กิตติธัช ฮวบน้อย  
นาย เทพพร อาจละออ  
นาย ธนะสิทธิ์ แสงประยูร  
นาย นิธิพร รักษายศ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ  
ดร. นิรุช จิรสวรรณกุล

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตติธัช ฮวบน้อย
2. นาย เทพพร อางละออ
3. นาย ธนะสิทธิ์ แสงประยูร
4. นาย นิธิพร รักษายศ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร เฉลิมชาติ มานพ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล)

## การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส

นาย กิตติธัช	ฮวบน้อย	
นาย เทพพร	อาจละอ	
นาย ธนะสิทธิ์	แสงประยูร	
นาย นิธิพร	รักษายศ	
ผศ.ดร.เฉลิมชาติ	มานพ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.นิรุธ	จิรสวรรณกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557		

### บทคัดย่อ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่มีใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมดังนั้นการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสจึงเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่าย โครงการงานนี้จึงนำเสนอผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสในกรณีต่างๆที่พบเป็นประจำในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อจะนำไปวิเคราะห์หาข้อสรุปและนำไปแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาโครงการนี้จำลองจากโปรแกรม MATLAB SIMULINK พบว่า สามารถจำลองปัญหาต่างๆได้อย่างครบถ้วนครอบคลุมกับปัญหาที่พบเป็นประจำในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในการทดสอบกับมอเตอร์จริงบางปัญหาไม่สามารถทำการจำลองได้ สุดท้ายนี้ การจำลองปัญหาในกรณีต่าง ๆ จะสอบทดสอบโดยกำหนดขอบเขตการซัปโพลต์ไว้เป็น 3 ระดับ คือ 0% 50% และ 100% เทียบกับขนาดพิกัดโพลต์สูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระบุไว้บน Name Plate เพื่อให้เกิดความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

# A Study the Effects Power Quality on 3-phase Induction Motor's Performance

Mr. Kittithat Huapnoi

Mr. Tapporn Artraor

Mr. Tanasit Sangprayoon

Mr. Nithiporn Ruksayod

Asst.Prof.Dr.Chalermchat Manop, Supervisor

Dr. Nirudh Jirasuwankul, Supervisor

Academic Year 2014

## Abstract

A 3-phase Induction Motor is the part of machines widely used in many industries, so the 3-phase Induction Motor maintenance is the most important part of the quality control of yielding and increasing productive efficiency that reduce time and expenses. This project presents the effects of power quality on 3-phase induction motor's performance. In each case, it is usually found in the industries in order to analyze summaries and solve problems correctly, and it is suitable for what they happened. This study result stimulates from MATLAB SIMULINK. It is informed that it can stimulate a lot of problems covered in the industries. In the actual motor test, they can't be stimulated. Finally, the stimulation in each case will be tested by determining 3 drive zones such as 0%, 50% and 100% compared to the maximum rated Induction Motor load. It is indicated on the nameplate to improve precision and reliability.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.เฉลิมชาติ มานพ และ ดร. นิรุช จิรสวรรณกุล ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมา ด้วยดีโดยตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในด้านเครื่องมือ และ อุปกรณ์ เจ้าหน้าที่ห้องสมุดที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูล และผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือทุก ๆ ท่าน

สุดท้ายนี้สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การสนับสนุน และกรุณา อนุเคราะห์ทุนการศึกษา รวมทั้งให้กำลังใจจนให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	XIII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงการงาน	5
2.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส	8
2.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส	9
2.3 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	13
2.3.1 การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล	13
2.3.2 การทดสอบแบบยัดโรเตอร์	15
2.4 การคำนวณค่าแรงบิดสูงสุด	17
2.5 การเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ	21
2.7 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ธันวาคม 2551	24
2.8 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	26
2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ	27
2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส	28
2.11 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะความถี่ผิดปกติ	28
2.12 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะเกิตฮาร์โมนิกส์	32
2.13 การกำหนดปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล	37
2.13.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 1 เฟส	38
2.13.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 2 เฟส	39
2.14 การคำนวณหาค่าโหลตในกรณีที่กำหนดไว้	40
2.15 การใช้โปรแกรมเพื่อการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ MATLAB	41
2.15.1 พื้นฐานการใช้ Matlab Simulink เบื้องต้น	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15.2 หน้าที่ของอุปกรณ์ในวงจรMATLAB SIMULINK	49
2.15.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	50
<b>บทที่ 3 การทดสอบและวิธีทดสอบ</b>	51
3.1 การทดสอบและวิธีการทดสอบในโปรแกรม MATLAB SIMULINK	51
3.1.1 วงจรที่ใช้ในการจำลอง	51
3.1.2 วงจรภายใน Subsystem	54
3.1.3 ค่าที่ใช้ในการจำลองในกรณีต่าง ๆ	54
3.1.4 แผนภาพแสดงการจำลองโปรแกรม MATLAB SIMULINK	56
3.1.5 แผนภาพแสดงการทดสอบ ( LAB TEST )	58
3.2 การทดสอบและวิธีการทดสอบ ( LAB TEST )	56
3.2.1 การทดสอบในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุลขณะไม่มีโหลด และขณะขับโหลด	60
3.2.2 วิธีทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	60
<b>บทที่ 4 ผลจากการทดลอง</b>	61
4.1 ผลจากการจำลองใน MATLAB SIMULINK	61
4.1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล	61
4.1.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	65
4.1.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส	65
4.1.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส	69
4.1.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส	73
4.1.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส	77
4.1.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส	77
4.1.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส	81
4.1.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส	85
4.1.4 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส	89
4.1.4.1 สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส	89
4.1.5 สภาวะความถี่ผิดปกติ	93
4.1.5.1 สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1%	93
4.1.5.2 สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1%	97
4.1.6 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์	101
4.1.6.1 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์	101
4.1.6.2 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก	104
4.1.6.3 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ	107
4.2 ผลจากการทดสอบ ( LAB TEST )	111
4.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล	111
4.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	113

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส	113
4.2.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส	116
4.2.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส	119
4.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ	121
4.2.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส	121
4.2.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส	124
4.2.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส	127
4.3 ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ ( LAB TEST )	129
4.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล	129
4.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	131
4.3.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส	133
4.3.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส	139
4.3.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส	145
4.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ	149
4.3.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส	149
4.3.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส	155
4.3.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส	161
<b>บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	165
5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	165
5.1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	165
5.1.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ	166
5.1.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบสามเฟส	166
5.1.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ	166
5.1.5 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์	167
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	168
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	169
<b>ภาคผนวก</b>	170
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	171
ประวัติผู้เขียน	176

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	5
2.2	โครงสร้างโรเตอร์แบบกรงกระรอก	5
2.3	โครงสร้างโรเตอร์แบบพันขดลวด	6
2.4	โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส	6
2.5	ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	7
2.6	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส 2 รูปแบบ	8
2.7	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส	9
2.8	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์	9
2.9	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กคงที่ และนำไปคิดรวมกับการสูญเสียทางกล	10
2.10	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้สำหรับพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า	10
2.11	ขั้นตอนการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	11
2.12	กราฟแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิด และสลลิปของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส	13
2.13	การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไม่มีภาระทางกล	13
2.14	วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในลักษณะยัดโรเตอร์	15
2.15	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ	17
2.16	คุณสมบัติแรงบิด-สลลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อปรับค่า $R_2$	18
2.17	วงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะเริ่มเดิน	19
2.18	วิธีการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก	21
2.19	การควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า	22
2.20	ค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า	22
2.21	การปรับความเร็วโดยการควบคุมแรงดัน	22
2.22	การปรับความเร็วโดยการปรับความต้านทานของโรเตอร์	23
2.23	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเมื่อพยายามรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่	30
2.24	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเมื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงด้วยสัดส่วนคงที่	31
2.25	แสดงการใช้ฟังก์ชัน Under-Frequency Limit หรือ Volt-per-Hertz เมื่อค่าความถี่ไฟฟ้าต่ำกว่าที่กำหนด	31
2.26	ค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	33
2.27	ค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์	34
2.28	ค่าฮาร์มอนิกส์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
2.29	กราฟฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค	35
2.30	ผลที่ได้จากการคำนวณใน MATLAB	42
2.31	แสดงตารางสูตรคูณแม่ 2 ถึงแม่ 12	43
2.32	Source	44
2.33	Sinks	45
2.34	Continuous	46
2.35	Discrete	47
2.36	Math Operations	48
2.37	แสดงวงจรการต่อมอเตอร์	50
2.38	แสดงการต่อวงจรมอเตอร์แบบ Y	50
3.1	วงจรโดยรวมที่ใช้ในการจำลอง	51
3.2	การปรับตั้งค่าในมอเตอร์	52
3.3	การปรับตั้งค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	52
3.4	การปรับตั้งค่าใน Bus Selector	53
3.5	วงจรภายใน Subsystem	54
3.6	แผนภาพการจำลองโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยรวม	56
3.7	แผนภาพการจำลองสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ	56
3.8	แผนภาพการจำลองสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ และจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส	57
3.9	แผนภาพการจำลองสภาวะความถี่ผิดปกติ และสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์	57
3.10	แผนภาพการทดสอบ (LAB TEST)	58
3.11	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	59
3.12	วงจรทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (LAB TEST)	60
4.1	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0%	61
4.2	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 50%	62
4.3	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100%	63
4.4	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%	65
4.5	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%	66
4.6	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%	67
4.7	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0%	69
4.8	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%	70
4.9	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%	71
4.10	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%	73
4.11	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%	74
4.12	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%	75
4.13	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%	77
4.14	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%	78

## สารบัญรูป ( ต่อ )

		หน้า
4.15	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%	79
4.16	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0%	81
4.17	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%	82
4.18	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%	83
4.19	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%	85
4.20	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%	86
4.21	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%	87
4.22	สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B , C ที่โหลด 0%	89
4.23	สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B , C ที่โหลด 50%	90
4.24	สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B , C ที่โหลด 100%	91
4.25	สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 0%	93
4.26	สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 50%	94
4.27	สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 100%	95
4.28	สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 0%	97
4.29	สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 50%	98
4.30	สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 100%	99
4.31	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 0%	101
4.32	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 50%	102
4.33	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 100%	103
4.34	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 0%	104
4.35	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 50%	105
4.36	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 100%	106
4.37	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 0%	107
4.38	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 50%	108
4.39	สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 100%	109
4.40	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0%	111
4.41	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 50%	111
4.42	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100%	111
4.43	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%	112
4.44	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%	114
4.45	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%	115
4.46	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0%	116
4.47	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%	117
4.48	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%	118
4.49	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%	119
4.50	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%	119

## สารบัญรูป ( ต่อ )

		หน้า
4.51	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%	120
4.52	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%	121
4.53	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%	122
4.54	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%	123
4.55	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0%	124
4.56	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%	125
4.57	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%	126
4.58	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%	127
4.59	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%	128
4.60	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%	128
4.61	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0% เฟส A	129
4.62	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 50% เฟส A	130
4.63	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100% เฟส A	131
4.64	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติที่เฟส A ที่โหลด 0% เฟส A	133
4.65	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติที่เฟส A ที่โหลด 0% เฟส B	134
4.66	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50% เฟส A	135
4.67	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50% เฟส B	136
4.68	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100% เฟส A	137
4.69	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100% เฟส B	138
4.70	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0% เฟส A	139
4.71	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0% เฟส C	140
4.72	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50% เฟส A	141
4.73	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50% เฟส C	142
4.74	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100% เฟส A	143
4.75	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100% เฟส C	144

## สารบัญรูป ( ต่อ )

		หน้า
4.76	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0% เฟส A	145
4.77	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50% เฟส A	146
4.78	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100% เฟส A	147
4.79	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0% เฟส A	149
4.80	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0% เฟส B	150
4.81	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50% เฟส A	151
4.82	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50% เฟส B	152
4.83	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100% เฟส A	153
4.84	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100% เฟส B	154
4.85	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0% เฟส A	155
4.86	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0% เฟส C	156
4.87	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50% เฟส A	157
4.88	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50% เฟส C	158
4.89	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100% เฟส A	159
4.90	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100% เฟส C	160
4.91	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0% เฟส A	161
4.92	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50% เฟส A	162
4.93	สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100% เฟส A	163

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ของค่า $X_1$ และ $X_2$ ในทางปฏิบัติอ้างอิงมาตรฐานของ IEEE Standard 112	17
2.2	ระดับแรงดันที่สภาวะปกติ และสภาวะฉุกเฉิน	24
2.3	ความผิดพลาดของแรงดัน	24
2.4	อันดับฮาร์มอนิกส์ และขีดจำกัดของกระแส	25
2.5	ค่าโหลดในกรณีที่กำหนดไว้	40
3.1	ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ	54
3.2	ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ	55
3.3	ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส	55
3.4	ค่าความถี่ในสภาวะความถี่ผิดปกติ	55
3.5	ค่าของแอมพลิจูดฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ (p.u.) และเฟสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ( $\phi$ ) ในสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์	56
4.1	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล	112
4.2	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส	115
4.3	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส	118
4.4	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส	120
4.5	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส	123
4.6	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส	126
4.7	ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส	128

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกวันนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Type) ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทาน การติดตั้งกระทำได้ง่าย ความถี่ในการดูแลรักษาต่ำ ราคาถูก รวมทั้งความสามารถในการทำงานที่สภาพแวดล้อมสกปรก มีประกายไฟ การควบคุมการทำงานได้มีการพัฒนาเทียบได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดีซี สามารถนำไปใช้กับปั๊ม พัดลม เครื่องมือกล ระบบสายพานลำเลียง และงานขับเคลื่อนอื่น ๆ อีกมากมาย แต่ในการทำงานจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะได้รับผลกระทบจากแหล่งจ่ายที่จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีประสิทธิภาพต่ำลง และอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบการทำงานของโรงงานอุตสาหกรรมได้ซึ่งอาจจะเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ , สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ , สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส , สภาวะความถี่ผิดปกติ และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ เป็นต้น ดังนั้นเราจึงต้องศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสที่มีโอกาสเกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมสูง เพื่อนำไปป้องกัน และวิเคราะห์เมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวจะได้แก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม และลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีผู้ศึกษาในหัวข้อ การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เป็นจำนวนมาก แต่ยังมีการศึกษาหัวข้อปัญหาที่ไม่ครอบคลุมทั้งหมดของปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษา และวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่พบมากในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างครอบคลุมขึ้นในโครงงานฉบับนี้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor)
2. ศึกษาปัญหาของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในกรณีต่าง ๆ ดังนี้
  - 2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ
  - 2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ
  - 2.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส
  - 2.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ
  - 2.5 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์
3. ศึกษาโปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อนำไปจำลองปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเก็บข้อมูลจากปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ
4. ศึกษาการใช้เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความชำนาญในการใช้

5. นำข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการจำลองปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในกรณีต่าง ๆ มาวิเคราะห์ และคาดการณ์ เพื่อนำไปแก้ไขได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่จะศึกษามีดังนี้ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ , สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ , สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส , สภาวะความถี่ผิดปกติ และสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์

- ในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส , สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส และสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส โดยแต่ละสภาวะจะต่ำกว่าปกติ 5% ของพิกัด

- ในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส , สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส และสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส โดยแต่ละสภาวะจะสูงกว่าปกติ 5% ของพิกัด

- ในสภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟสจะศึกษาเพียงกรณีเดียว คือ สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส

- ในสภาวะความถี่ผิดปกติแบ่งเป็น 2 กรณี คือ สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% และสภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1%

- ในสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์จะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ , สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก และสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ โดยทุกกรณีจะเกิดฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 และ 5

กำหนดขอบเขตการมีโหลดได้แก่ 0% , 50% และ 100% โดยใช้มอเตอร์พิกัด 5.4 HP (4KW) 400V 50 Hz 1430 RPM ใน MATLAB SIMULINK และใช้มอเตอร์พิกัด 1 HP 380V 50 Hz 1400 RPM ในการทดลองจริง

### 1.4 วิธีการใช้ในโครงการ

วิธีการที่ใช้ในโครงการนี้สามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการนี้

1.4.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อที่จะสามารถนำไปจำลองปัญหาที่เกิดขึ้นจริง

1.4.3 กำหนดปัญหาในกรณีต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.4.4 จำลองปัญหาต่าง ๆ ที่ได้กำหนดข้างต้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK และจากการทดสอบมอเตอร์จริง แล้วบันทึกผลการทดลองลงในตารางบันทึกผล

1.4.5 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ และคาดการณ์ เพื่อนำไปแก้ไขได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสมกับปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

เดือน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
หัวข้อ									
1.ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการนี้									
2.ศึกษารูปแบบการเขียนปริญญานิพนธ์โดยค้นคว้าข้อมูลจากหอสมุดกลาง									
3.เรียนรู้วิธีการใช้ MATLAB SIMULINK									
4.ศึกษาปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส - สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ - สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ - สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส - สภาวะความถี่ผิดปกติ - สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์									
5.ศึกษา และค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบไฟฟ้าจาก การไฟฟ้าแห่งประเทศไทย									
6.จำลองปัญหาที่ได้จากการกำหนดลงในโปรแกรม MATLAB SIMULINK									
7.จำลองปัญหาต่างๆโดยการทดสอบกับมอเตอร์จริงแล้วบันทึกผลการทดลอง									
8. รวบรวมผลการทดลองทั้งหมดและสรุปผลการทดลองแล้วมาวิเคราะห์ และคาดการณ์ เพื่อนำไปแก้ไขได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสมกับปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส									
9.เตรียมจัดทำปริญญานิพนธ์ในการนำเสนอผลงาน									

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. จากการศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสทำให้ทราบว่าปัญหาของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสอยู่หลายกรณี ดังนี้

- 1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ
- 1.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ
- 1.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส
- 1.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ
- 1.5 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์

2. จากการศึกษาปัญหาของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้ทราบถึงสาเหตุของปัญหาในกรณีต่าง ๆ

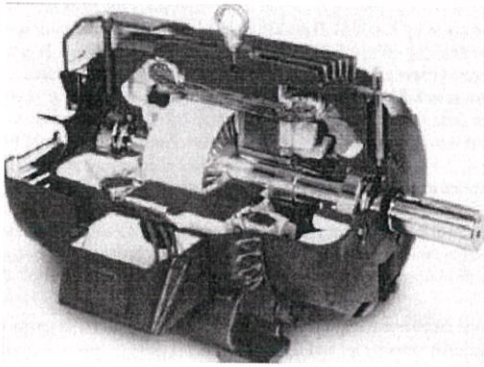
3. สามารถใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK มาจำลองปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ทราบถึงผลที่ตามมาเมื่อเกิดปัญหา

4. มีความรู้ความสามารถในการใช้เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความชำนาญ

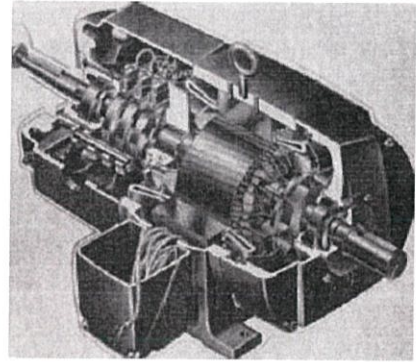
5. สามารถนำข้อมูลที่เก็บจากการจำลองปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ในกรณีต่าง ๆ มาวิเคราะห์ และคาดการณ์ เพื่อนำไปแก้ไขได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสมกับปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโรงงาน

โรเตอร์แบบกรงกระรอก และแบบพันขดลวด (Squirrel-Cage and Wound Rotors) มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน โครงสร้างเครื่องจักรแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีลักษณะแท่งตัวนำวางเรียงอยู่ในแนวตามความยาวของโรเตอร์ และแท่งตัวนำเหล่านี้มีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าโดยการลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2.2 โรเตอร์ลักษณะนี้เรียกชื่อว่าแบบกรงกระรอก (Squirrel-Cage Rotor) โรเตอร์อีกแบบหนึ่งจะมีลักษณะเป็นการพันขดลวด (Wound rotor) ซึ่งสามารถลัดวงจรให้ขดลวดต่อถึงกัน หรือต่อเชื่อมกับวงจรไฟฟ้าภายนอกได้โดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip Rings) และแปรงถ่าน (Brush) ดังรูปที่ 2.3

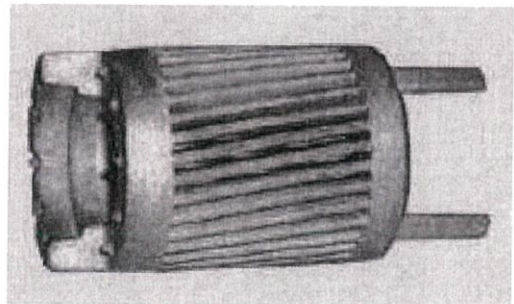
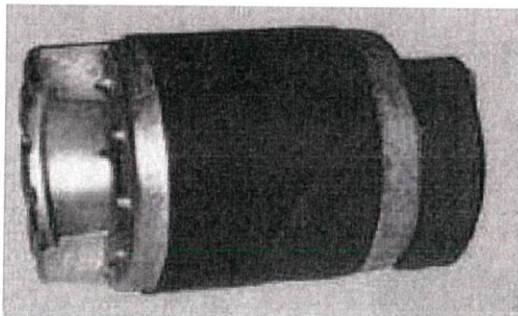


ก) แบบกรงกระรอก

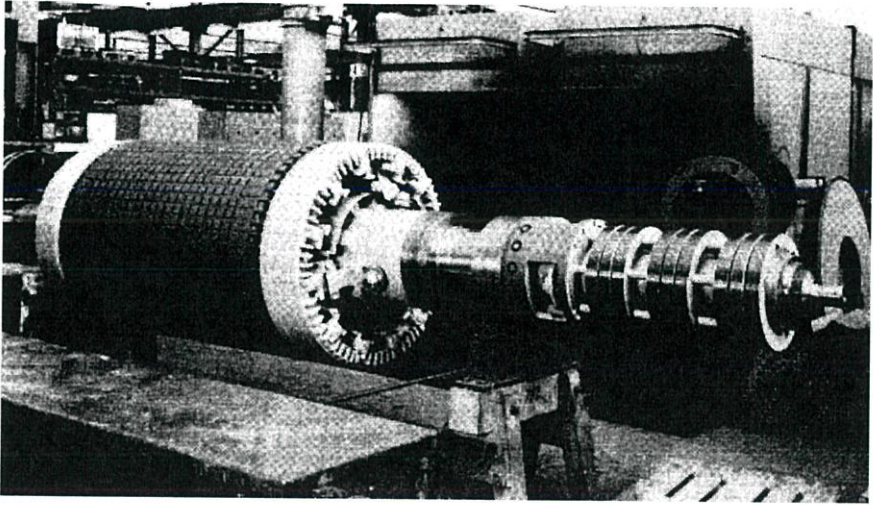


ข) แบบพันขดลวด

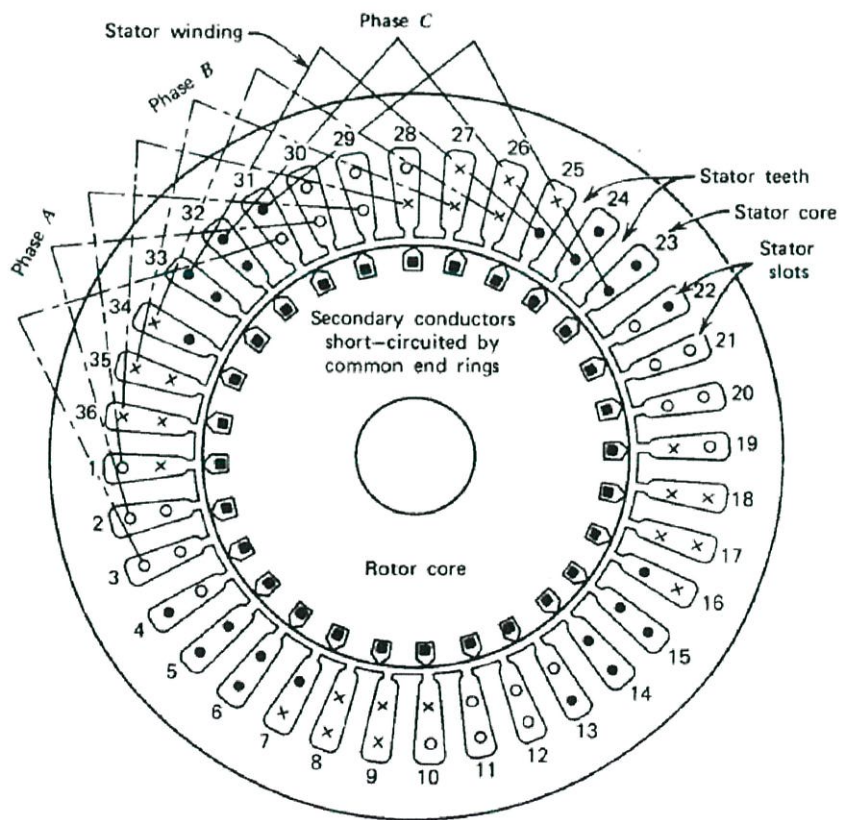
รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโรเตอร์แบบกรงกระรอก



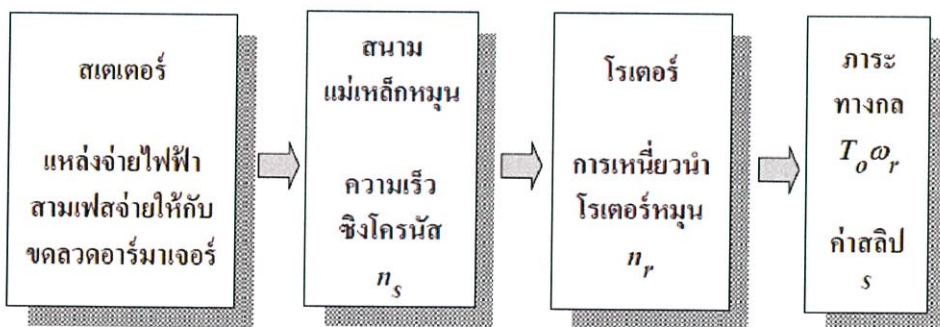
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโรเตอร์แบบฟันขดลวด



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส

โครงสร้างของสเตเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคือประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส (a , b , c ) และมีการต่อร่วมกันแบบสตาร์ หรือแบบเดลต้าดังรูปที่ 2.4 เมื่อขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายภายนอกจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นมาที่มีความเร็วซิงโครนัส  $n_s$  โดยที่ความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า และจำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้า และยังสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟสคู่ใดคู่หนึ่งดังนั้นจะเห็นได้ว่าแท่งตัวนำต่าง ๆ ที่วางอยู่บนโรเตอร์จะเกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนโดยพิจารณาในลักษณะแนวเคลื่อนที่สัมพัทธ์แท่งตัวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำค่ากระแสนี้จะมีผลทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่าง ๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วของโรเตอร์  $n_r$  จะเห็นได้ว่าความเร็วโรเตอร์นี้จะไม่สามารถมีขนาดเท่ากับความเร็วซิงโครนัสทั้งนี้เนื่องจากถ้าความเร็ว  $n_r = n_s$  แท่งตัวนำจะมีสภาพหยุดนิ่งอยู่กับที่เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนทำให้ไม่สามารถเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นได้ทั้งนี้เพราะแท่งตัวนำไม่มีการตัดกับสนามแม่เหล็กจึงไม่สามารถเกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำ

ขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นจากหลักการพื้นฐานดังกล่าวเครื่องจักรไฟฟ้านี้จึงเรียกชื่อว่ามีมอเตอร์เหนี่ยวนำพิจารณาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มหมุน (โรเตอร์อยู่นิ่งกับที่กำลังจะหมุน  $n_r = 0$  ) แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนเต็มทีด้วยความเร็วซิงโครนัส  $n_s$  และเมื่อโรเตอร์เกิดการหมุนด้วยความเร็ว  $n_r$  แท่งตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว  $n_s - n_r$  จะเห็นได้ว่าในขณะที่เริ่มหมุนโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำมากที่สุด และต่อจากนั้นการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าภาระทางกล เช่นเมื่อมีภาระทางกลน้อย ๆ หรือสภาพไม่มีภาระทางกล (No-Load) ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์จะเกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเล็กน้อยเนื่องจากต้องการภาระทางกลเพียงเล็กน้อย (ค่าแรงเสียดทานทางกลของโรเตอร์) และเมื่อภาระทางกลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วโรเตอร์ลดลงมีผลทำให้โรเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำที่มากขึ้น และจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ และแรงทางกลมากขึ้นได้ตามความต้องการของภาระทางกลการเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้า (กระแส) ที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกตามความต้องการของภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป  $s$  (Slip) ดังนี้

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-1)$$

เมื่อเป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีหน่วย  $n_s$  และ  $n_r$  มีหน่วยเป็น rpm

$$n_r = (1 - s)n_s \quad (2-2)$$

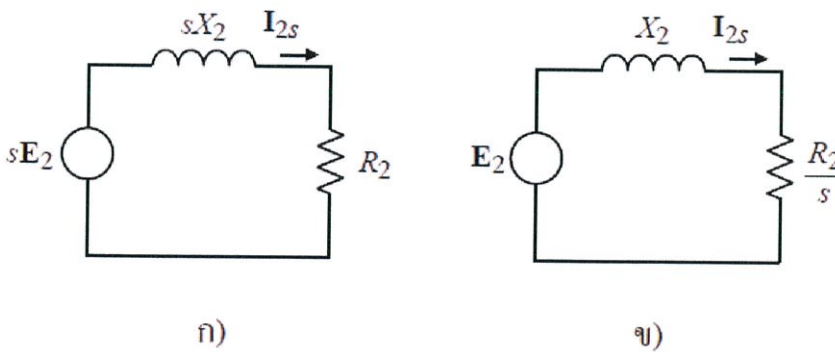
ในขณะที่เริ่มหมุนค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และขณะที่ไม่มีภาระทางกลค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวก และอยู่ระหว่างค่า 0 ถึง 1 และค่าสลิปจะไม่มีค่าเป็นศูนย์

ความถี่ของโรเตอร์  $f_r = sf_c$  (2-3)

ในขณะที่เริ่มหมุน (Starting) ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 ความถี่ของโรเตอร์  $f_r$  จะเท่ากับความถี่  $f_c$  ของสเตเตอร์

### 2.1 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)

จากสมการที่ 2-3 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าสลิป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส 2 รูปแบบ

$$X_{2s} = sX_2 \quad (2-4)$$

เมื่อ  $X_{2s}$  และ  $X_2$  เป็นค่า Leakage Reactance ของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่งตามลำดับ

$$E_{2s} = sE_2 \quad (2-5)$$

เมื่อ  $E_{2s}$  และ  $E_2$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และขณะหยุดนิ่งตามลำดับ

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปที่ 2.6 ก) จะได้ว่า

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (2-6)$$

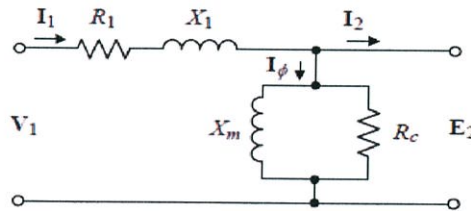
เมื่อ  $I_{2s}$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใด ๆ และ  $R_2$  เป็นความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์จัดรูปสมการที่ 2-6 ใหม่จะได้ว่า

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (X_2)^2}} \quad (2-7)$$

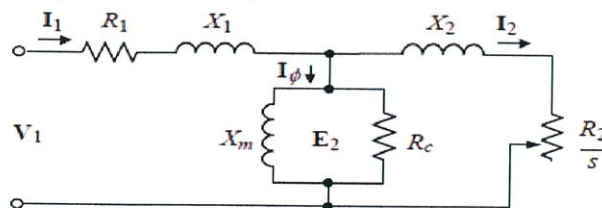
ซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลไฟฟ้าใหม่ได้ดังรูปที่ 2.6 ข)

## 2.2 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 กำหนดให้  $V_1, I_1$  และ  $R_1$  เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าพิกัดค่ากระแสความต้านทานไฟฟ้า และความต้านทานเสมือน (Leakage Reactance) ขณะหยุดนิ่งของสเตเตอร์ตามลำดับ  $R_c$  และ  $X_m$  เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Resistance) และค่าความต้านทานเสมือนการสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Reactance) ของสเตเตอร์ตามลำดับจากการพิจารณารวมวงจรสมมูลในรูปที่ 2.6 และ 2.7 จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.8 โดยกำหนดให้ค่า  $E_2, I_2, R_2$  และ  $X_2$  เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้ว



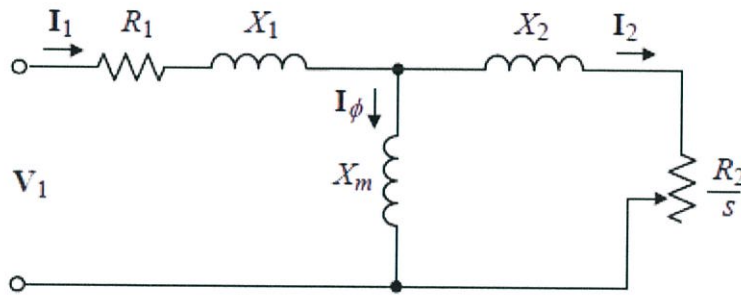
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส



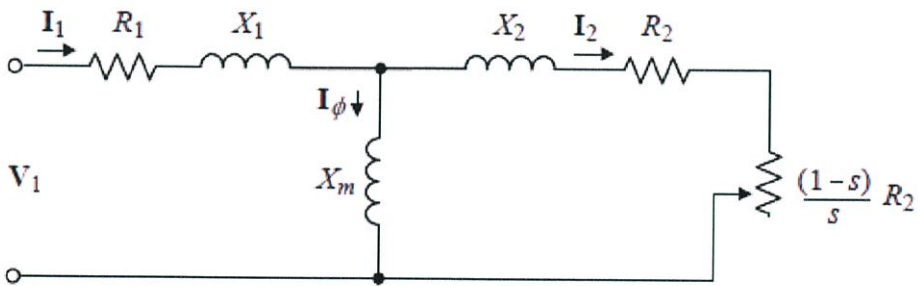
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์

คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า และแรงบิด (Power and Torque Characteristics) เมื่อพิจารณาให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และนำไปคิดรวมกับการสูญเสียทางกลจะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสดังรูปที่ 2.9 ซึ่งค่า  $I_2$ ,  $R_2$  และ  $X_2$  เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้ว และกำหนดให้วงจรสมมูลในส่วนโรเตอร์เปลี่ยนใหม่เป็นดังรูปที่ 2.10 โดยที่

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{(1-s)}{s} R_2 \quad (2-8)$$

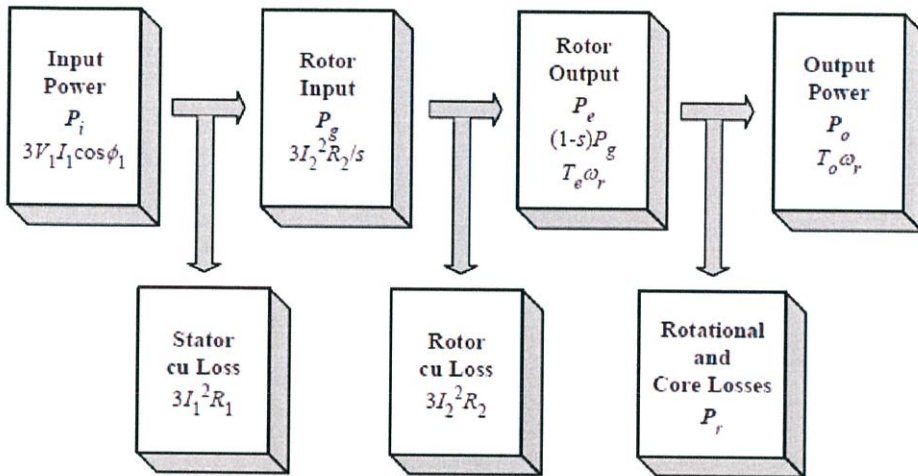


รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กคงที่ และนำไปคิดรวมกับการสูญเสียทางกล



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้สำหรับพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า

จากสมการที่ 2-8 และรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าค่า  $R_2$  แสดงถึงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ และ ค่า  $\frac{(1-s)}{s}R_2$  จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากโรเตอร์ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล



**รูปที่ 2.11** ขั้นตอนการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

จากรูปที่ 2.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟสทั้งหมดที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Input Power - Electrical Power) พิจารณาได้จาก

$$P_i = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2-9)$$

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator Copper Loss)

$$P_{cu,1} = 3I_1^2 R_1 \quad (2-10)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์ (Rotor Input - Power Across Air Gap)

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2-11)$$

ค่าสูญเสียจากลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

$$P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 = sP_g \quad (2-12)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Rotor Output - Electromagnetic Power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2-13)$$

$$P_e = P_g - sP_g = (1-s)P_g \quad (2-14)$$

ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2-15)$$

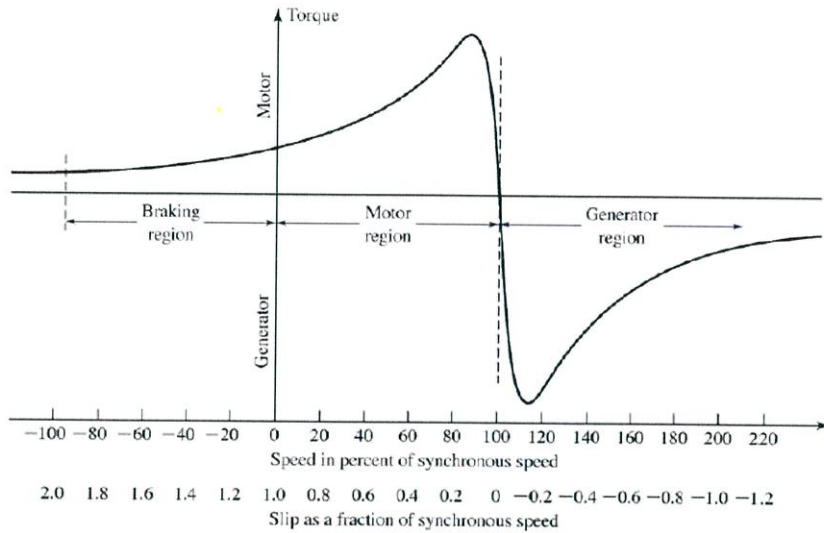
ค่ากำลังทางกลทั้งหมดที่ออกจากมอเตอร์ (Output Power - Mechanical Power)

$$P_o = P_e - P_r \quad (2-16)$$

เมื่อ  $P_r$  เป็นค่ารวมของค่าสูญเสียจากการหมุน (Rotational Losses) และค่าสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นค่าแรงบิดทางกลของมอเตอร์ (Output Torque) พิจารณาได้จาก

$$T_o = \frac{P_o}{\omega_r} \quad (2-17)$$

ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน โรเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างขึ้นโดยกระแสสเตเตอร์ ความเร็วของโรเตอร์จะมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ และความเร็วซิงโครนัสทำให้เกิดสลลิป  $s$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 และ 0 ซึ่งแสดงได้ในช่วง Motor Region ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าขณะมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีค่า  $s=1.0$  สำหรับการทำงานในช่วงที่ค่าสลลิปมีค่ามากกว่า 1.0 จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าเป็นลบ นั่นคือมอเตอร์จะต้องถูกทำให้หมุนทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนเดิมซึ่งจะกระทำได้โดยการสลับเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพียงคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนกลับทิศในทันทีทันใด วิธีการนี้เป็นการทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว (Plugging) ซึ่งแสดงอยู่ในช่วง Breaking Region ดังรูปที่ 2.12 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ถ้าขดลวดสเตเตอร์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส และโรเตอร์ของเครื่องจักรถูกขับเคลื่อนโดยต้นกำลังทางกล (Prime Mover) ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้สลลิป  $s$  มีค่าเป็นลบซึ่งแสดงได้ในช่วง Generator Region ดังรูปที่ 2.12



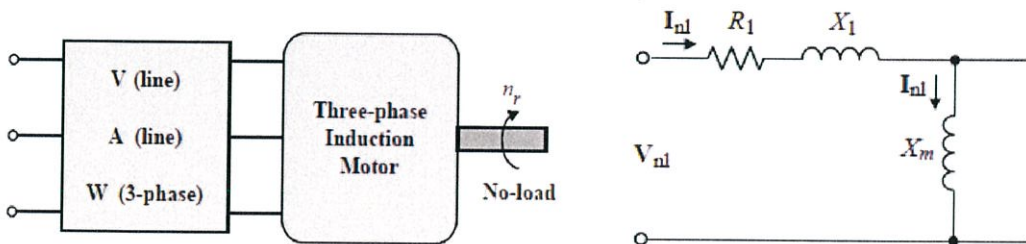
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงคุณลักษณะค่าแรงบิด และสลิปของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส

### 2.3 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (Three-Phase Induction Motor Tests)

สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะทำงานที่ภาระทางกลค่าต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลจะหาได้จากผลการทดสอบมอเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า กระแสตรงของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_1$ ) การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล (No-Load) และการทดสอบแบบยัดโรเตอร์ (Blocked-Rotor)

#### 2.3.1 การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล (No-Load Test)

ในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบมอเตอร์แบบนี้จะได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่ากระแสกระตุ้น และค่าสูญเสียขณะไม่มีภาระทางกล การทดสอบจะกระทำที่พิกัดความถี่ และแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลโดยที่มอเตอร์ไม่มีภาระดังรูปที่ 2.14 ก) และให้มอเตอร์หมุนไประยะเวลาหนึ่งจากนั้นทำการบันทึกค่า  $V$ ,  $A$  และ  $W$  ที่แรงดันไฟฟ้าพิกัดโดยกำหนดให้  $P_{nl}$  เป็นกำลังไฟฟ้าสามเฟส  $V_{nl}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส และ  $I_{nl}$  เป็นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส



ก) วงจรการทดสอบ

ข) วงจรสมมูลต่อเฟส

รูปที่ 2.13 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบไม่มีภาระทางกล

ขณะไม่มีภาระทางกล กระแสในโรเตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อยเพื่อใช้สำหรับสร้างแรงบิดที่สามารถเอาชนะความเสียดทาน และแรงต้านลม (Friction and Windage) จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสีย  $I^2R_2$  ในโรเตอร์ขณะไม่มีภาระจะมีค่าน้อย (ละทิ้งได้) แต่เนื่องจากวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์จะมีช่องอากาศอยู่ทำให้ค่ากระแสกระตุ้นในสเตเตอร์จะมีค่าสูงกว่าปกติทำให้จะต้องคำนึงถึงค่าสูญเสีย  $I^2R_1$  ในสเตเตอร์ด้วย ดังนั้นขณะไม่มีภาระทางกลความเร็วมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ค่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะมีผลทำให้วงจรสมมูลด้านขวามือ (ส่วนโรเตอร์) ของมอเตอร์ในรูปที่ 2.9 มีสภาพเปิดวงจรดังรูปที่ 2.14 ข)

ในการทดสอบค่าสูญเสียจากการหมุน และค่าสูญเสียในแกนเหล็ก  $P_r$  หาได้จาก

$$P_r = P_{nl} - 3I_{nl}^2 R_1 \quad (2-18)$$

ถ้าในกรณีที่สามารถทราบค่าสูญเสียจากความเสียดทาน และแรงต้านลม  $P_{fw}$  ค่าสูญเสียในแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้จาก

$$P_{core} = P_r - P_{fw} \quad (2-19)$$

และค่า Core-Loss Resistance จะประมาณค่าได้จาก  $R_c \approx \frac{3V_{nl}^2}{P_{core}}$  ซึ่งในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องพิจารณาหาค่า  $R_c$  ในวงจรสมมูลจากรูปที่ 2.14 ข) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเสมือนที่ปรากฏในขณะทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลจะมีค่าประมาณ

$$X_{nl} \approx X_1 + X_m \quad (2-20)$$

ค่า  $X_{nl}$  จะพิจารณาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ( $Q_{nl}$ ) ซึ่งได้จากข้อมูลการทดสอบดังนี้

$$Q_{nl} = \sqrt{S_1 - P_{nl}^2} \quad (2-21)$$

โดยที่  $S_1 = 3V_{nl}I_{nl}$  และค่า  $X_{nl}$  จะคำนวณได้จาก

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{3I_{nl}^2} \approx \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (2-22)$$

หรือสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลดังนี้

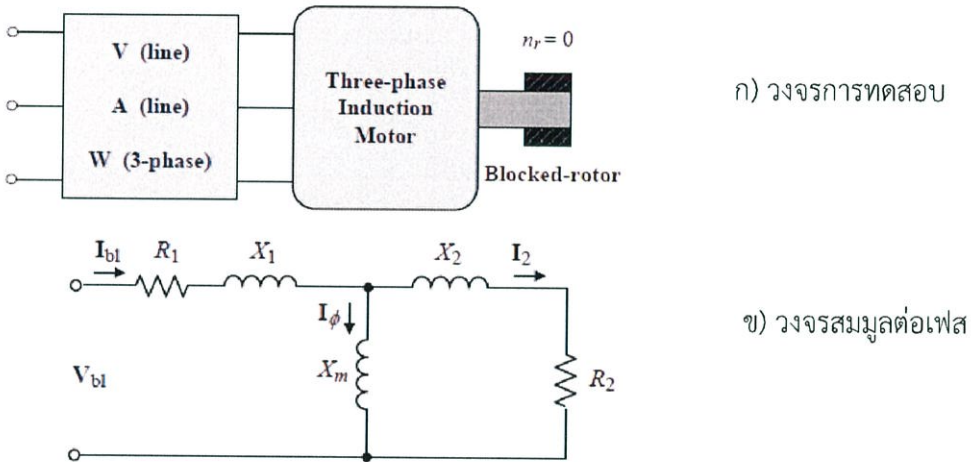
$$|Z_{nl}| = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (2-23)$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} \quad (2-24)$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \quad (2-25)$$

### 2.3.2 การทดสอบแบบยัดโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

ในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบนี้จะได้ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลให้กับมอเตอร์ในขณะที่โรเตอร์จะถูกยัดไว้ไม่ให้หมุน ( $s = 1$ ) ดังรูปที่ 2.15 ก)



รูปที่ 2.14 วงจรการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในลักษณะยัดโรเตอร์

ทำการบันทึกค่า  $V$ ,  $A$  และ  $W$  โดยกำหนดให้  $P_{b1}$  เป็นกำลังไฟฟ้าสามเฟส  $V_{b1}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส, เป็นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส และ  $f_{b1}$  เป็นความถี่ที่ใช้ทดสอบ ในการทดสอบ จะกระทำภายใต้เงื่อนไขที่เกิดค่ากระแสเตเตอร์ และความถี่ของโรเตอร์โดยประมาณเท่ากับค่าที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำงานในสภาพต่าง ๆ เช่น ถ้าสนใจคุณลักษณะในสภาพการทำงานที่ค่านั้นคือตอนเริ่มต้นหมุนในการทดสอบจะใช้ความถี่ปกติ (พิกัด)  $f_{rated}$  และที่ค่ากระแสประมาณค่าที่เกิดขึ้นตอนเริ่มต้นหมุน (กระแสสูง) ถ้าต้องการพิจารณาคุณลักษณะในสภาพการทำงานปกติ (ที่พิกัด) ในการทดสอบจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนทำให้เกิดค่ากระแสในสเตเตอร์เท่ากับพิกัด และความถี่ที่ใช้จะต้องลดลงด้วยเพื่อให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดขึ้นจริงในโรเตอร์ในการทดสอบตามมาตรฐานของ IEEE 112 จะแนะนำให้ทดสอบที่ความถี่ 25 % ของความถี่พิกัด (มอเตอร์พิกัดต่ำกว่า 25 hp ไม่จำเป็นต้องทดสอบในลักษณะนี้สามารถใช้ความถี่พิกัดได้) ความต้านทานเสมือนที่ได้จากการทดสอบยัดโรเตอร์  $X_{b1}$  จะหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนขณะยัดโรเตอร์ดังนี้

$$Q_{b1} = \sqrt{S_{b1}^2 - P_{b1}^2} \quad (2-26)$$

โดยที่  $S_{b1} = 3V_{b1}I_{b1}$  และค่า  $X_{b1}$  ขณะยึดโรเตอร์ที่ความถี่พิกัดจะคำนวณได้จาก

$$X_{b1} = \left( \frac{f_{rated}}{f_{b1}} \right) \left( \frac{Q_{b1}}{3I_{b1}^2} \right) \quad (2-27)$$

ความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบยึดโรเตอร์  $R_{b1}$

$$R_{b1} = \frac{P_{b1}}{3I_{b1}^2} \quad (2-28)$$

จากรูปที่ 2.9 จะได้ว่าเมื่อ  $s = 1$

$$\begin{aligned} Z_{b1} &= (R_1 + jX_1) + \frac{(R_2 + jX_2)jX_m}{R_2 + j(X_2 + X_m)} \\ &= R_1 + R_2 \left[ \frac{X_m^2}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right] + j \left[ X_1 + \frac{X_m(R_2^2 + X_2(X_m + X_2))}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right] \end{aligned} \quad (2-29)$$

เมื่อ  $R \ll X_m$

$$Z_{b1} = R_1 + R_2 \left( \frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 + j \left[ X_1 + X_2 \left( \frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \right] \quad (2-30)$$

$$R_{b1} = R_1 + R_2 \left( \frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 \quad (2-31)$$

$$X_{b1} = X_1 + X_2 \left( \frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \quad (2-32)$$

$$R_2 = (R_{b1} - R_1) \left( \frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (2-33)$$

$$X_2 = (X_{b1} - X_1) \left( \frac{X_m}{X_m + X_1 - X_{b1}} \right) \quad (2-34)$$

แทนค่า  $X_{n1} = X_1 + X_m$  จากสมการที่ (2-20) จะได้ว่า

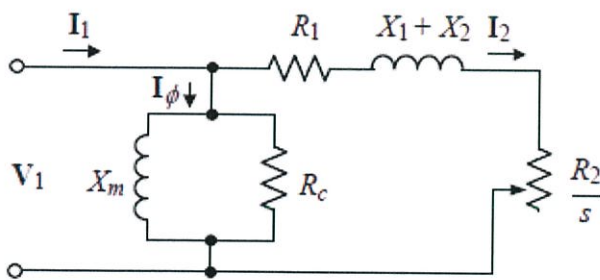
$$X_2 = (X_{b1} - X_1) \left( \frac{X_{n1} - X_1}{X_{n1} - X_{b1}} \right) \quad (2-35)$$

จะเห็นได้ว่าค่า  $X_2$  จะได้จากการวัดค่า  $X_{n1}$  และ  $X_{b1}$  ในการทดสอบ และค่า  $X_1$  ของสเตเตอร์ซึ่งยังไม่ทราบค่า และในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะวัดค่า  $X_1$  อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ IEEE 112 จะแนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ของค่า  $X_1$  และ  $X_2$  ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งในกรณีที่มอเตอร์ระดับ (Class) ของมอเตอร์จะแนะนำให้กำหนดว่า  $X_1$  และ  $X_2$  มีค่าเท่ากัน

**ตารางที่ 2.1** ความสัมพันธ์ของค่า  $X_1$  และ  $X_2$  ในทางปฏิบัติอ้างอิงมาตรฐานของ IEEE Standard 112

Motor class	Description	Fraction of $X_1 + X_2$	
		$X_1$	$X_2$
A	Normal starting torque, normal starting current	0.5	0.5
B	Normal starting torque, low starting current	0.4	0.6
C	High starting torque, low starting current	0.3	0.7
D	High starting torque, high slip	0.5	0.5
Wound rotor	Performance varies with rotor resistance	0.5	0.5

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 2.9 สามารถนำมา พิจารณาใหม่ให้มีลักษณะที่ง่ายยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.16 เรียกว่าวงจรสมมูลแบบประมาณ (Approximated Equivalent Circuit) เช่นเดียวกันกับวงจรสมมูลแบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นแต่ไม่มากนักข้อได้เปรียบของการใช้วงจรสมมูลแบบประมาณคือสามารถพิจารณาหาคุณลักษณะพิเศษต่าง ๆ เช่นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแรงบิดสูงสุดหรือประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์ได้อย่างสะดวก และ



วงจรสมมูลแบบประมาณดังรูปที่ 2.16 อาจจะได้มาจากผลการทดสอบมอเตอร์แบบไม่มีภาระทางกล และจากการทดสอบแบบยึดโรเตอร์โดยที่ใช้เพียงข้อมูลของกระแส และความถี่พิกัดเท่านั้น

**รูปที่ 2.15** วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบประมาณ

## 2.4 การคำนวณค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque Calculation)

จากวงจรสมมูลแบบประมาณดังรูปที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2-36)$$

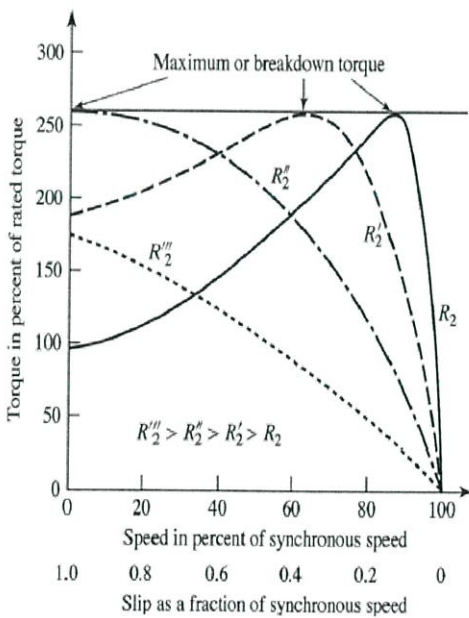
เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (2-11) จะสามารถพิจารณาหาค่ากำลังไฟฟ้า และแรงบิดในสภาวะต่าง ๆ ได้จากวงจรสมมูลแบบประมาณในรูปที่ 2.16 ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดของมอเตอร์จะเกิดขึ้นเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ  $\frac{R_2}{s}$  มีค่ามากที่สุดซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่  $\frac{R_2}{s}$  มีขนาดเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของ  $R_1 + j(X_1 + X_2)$  ที่ต่ออยู่ระหว่าง  $\frac{R_2}{s}$  กับแหล่งจ่ายดังนี้

$$\frac{R_2}{s_{\max,T}} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (2-37)$$

ดังนั้นค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ค่าสลิปเท่ากับ

$$s_{\max,T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2-38)$$

นำค่า  $s_{\max,T}$  แทนค่าในสมการที่ (2-36) และสมการที่ (2-11) ถึง (2-15) จะสามารถคำนวณหาค่า



แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดได้จากสมการที่ (2-38) จะเห็นได้ว่าค่าสลิปที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดหรือแท่งตัวนำที่โรเตอร์  $R_2$  แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของแรงบิดสูงสุดนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า  $R_2$  ดังนั้นสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวดอาจจะนำค่าความต้านทานไฟฟ้าภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์ (โดยใช้วงแหวนสลิปกับแปรงถ่าน) ซึ่งเป็นการเพิ่มค่า  $R_2$  เพื่อปรับค่าสลิปที่เกิดแรงบิดสูงสุดโดยค่าของแรงบิดสูงสุดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (เมื่ออัตราส่วน  $\frac{R_2}{s}$  คงที่) ดังรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.16 คุณสมบัติแรงบิด-สลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อปรับค่า  $R_2$

จากวงจรสมมูลแบบประมาณดังรูปที่ 2.16 สามารถนำมาพิจารณาหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์ได้โดยกำหนดให้  $P_r$  เป็นค่าผลรวมของการสูญเสียจากการหมุน และการสูญเสียในแกนเหล็ก ค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่า

$$P_i = 3V_1 I_2 \cos \phi \quad (2-39)$$

เมื่อเป็นมุมระหว่าง  $V_1$  กับ  $I_1$  และค่ากำลังทางกลที่ออกจากมอเตอร์มีค่า

$$P_o = 3V_1 I_2 \cos \phi - 3I_2^2 (R_1 + R_2) - P_r \quad (2-40)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์พิจารณาได้จาก

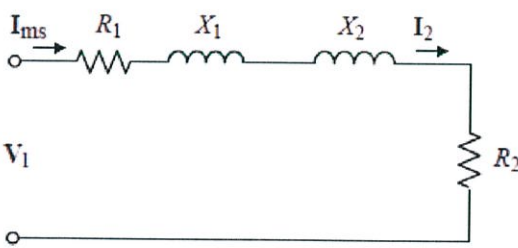
$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{3V_1 I_2 \cos \phi - 3I_2^2 (R_1 + R_2) - P_r}{3V_1 I_2 \cos \phi} \quad (2-41)$$

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าผลรวมของการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์มีค่าเท่ากับค่าผลรวมของการสูญเสียจากการหมุน และการสูญเสียในแกนเหล็ก

$$3I_2^2 (R_1 + R_2) = P_r \quad (2-42)$$

## 2.5 การเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Starting of Induction Motors)

เมื่อเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ ค่าสลลิปจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $s = 1$ ) จากรูปที่ 2.20 กำหนดให้กระแสกระตุ้นมีค่าน้อย จะเห็นได้ว่าเนื่องจากความต้านทานของขดลวดหรือตัวนำที่โรเตอร์มีค่าน้อยมาก



จะทำให้กระแสโรเตอร์ (กระแสสเตเตอร์) ขณะเริ่มหมุนมีค่าสูงมากซึ่งอาจจะทำให้ขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์เกิดความเสียหายจากความร้อนที่มากเกินไปการเริ่มเดินมอเตอร์โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ การต่อโดยตรง (Direct) และการลดแรงดัน (Reduced-Voltage)

รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะเริ่มเดิน

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลในรูปที่ 2.20 ขนาดของกระแสเริ่มหมุนจะมีค่า

$$I_{ms} = \frac{V_1}{Z_s} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2-43)$$

จากสมการที่ (2-13) และ (2-15) จะได้ว่า

$$\frac{T_s}{T_{\Pi}} = \left( \frac{I_{ms}}{I_{\Pi}} \right)^2 s_{\Pi} \quad (2-44)$$

เมื่อ  $T_s$  เป็นค่าแรงบิดเริ่มต้นหมุน  $T_{\Pi}$ ,  $I_{\Pi}$  และ  $s_{\Pi}$  เป็นค่าแรงบิดกระแส และ สลิปที่เต็มพิกัดกระแสเริ่มหมุนของการต่อโดยตรง ( $I_{ds}$ ) จะมีค่าสูงมาก (ประมาณ 5-8 เท่าของ กระแสที่เต็มพิกัด) จะได้แรงบิดเริ่มต้นหมุนที่มากกว่าวิธีการลดแรงดันแต่มีข้อควรระวัง คือกระแสสูง มาก ดังนั้นมอเตอร์ควรจะมีอัตราความเร่งสูงเพื่อทำให้เวลาในการเริ่มเดินสั้นที่สุด วิธีการนี้เหมาะ สำหรับการเริ่มเดินมอเตอร์เมื่อภาระทางกลน้อย ๆ และมีขนาดเล็ก ๆ (ไม่เกิน 10 แรงม้า)

ในกรณีวิธีลดแรงดัน กระแสเริ่มหมุนจะมีค่าลดลงอยู่ในระดับที่ปลอดภัย แต่การลด แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะทำให้แรงบิดเริ่มต้นหมุนลดลงอย่างมากทั้งนี้เพราะค่าแรงบิดจะ แปรผันตรงตามค่าแรงดันยกกำลังสอง การเริ่มเดินมอเตอร์โดยวิธีลดแรงดันสามารถกระทำได้หลาย แนวทางดังนี้

1) การเริ่มเดินโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สเตเตอร์ (Stator-Impedance Starting) กระทำ ได้โดยการต่ออิมพีแดนซ์ภายนอกอนุกรมกับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสเพื่อจำกัดค่ากระแสเริ่ม หมุน และจะถูกตัดทิ้งออกไปโดยการลัดวงจรเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ วิธีการนี้ไม่เป็น ที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ต่ำเนื่องจากการเพิ่มค่าสูญเสียจากความต้านทานภายนอกที่ ต่อเพิ่มเข้าไป

2) การเริ่มเดินโดยใช้หม้อแปลงแบบออโต (Autotransformer) วิธีนี้จะประกอบด้วย หม้อแปลงแบบออโต และสวิตช์ซึ่งหม้อแปลงออโตจะช่วยให้การลดระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ จะ เห็นได้ว่าวิธีการนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนลักษณะเช่นเดียวกันกับวิธีการที่ 1 แต่จะมีกระแสเริ่มหมุนใน สายมีค่าน้อยกว่า ถ้าลดระดับแรงดัน ( $V_s$ ) ที่จ่ายให้มอเตอร์ไป  $x$  เท่าของแรงดันปกติ ( $V_s = xV_1$ ) จะทำให้กระแส ( $I_{rms}$ ) และแรงบิด ( $T_s$ ) ขณะเริ่มเดินมอเตอร์มีค่าลดลงไป  $x^2$  เท่า และเมื่อ มอเตอร์หมุนไปได้ประมาณ 80 % ของความเร็วปกติ จะใช้สวิตช์ทำการตัดหม้อแปลงออโตออกจาก วงจรเพื่อทำให้มอเตอร์ได้รับแรงดันเต็มพิกัดปกติ ( $V_1$ ) ในปัจจุบันการลดแรงดันอาจใช้ตัวควบคุม แรงดันกระแสสลับโซลิตสเตท (AC Voltage Controller) ซึ่งสามารถโปรแกรมให้เกิดการเริ่มเดิน แบบนิ่มนวล (Soft start)

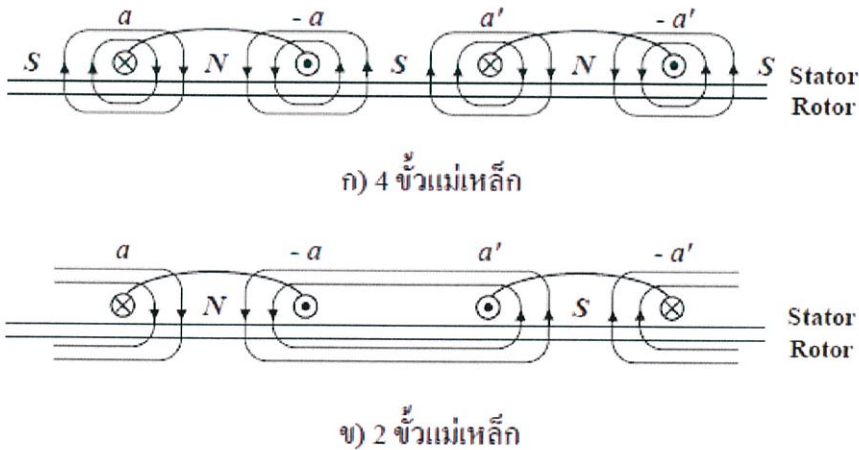
3) การเริ่มเดินโดยการต่อแบบสตาร์-เดลต้า (Star-Delta Starting) วิธีนี้จะใช้กับ มอเตอร์ที่มีการทำงานในสภาวะปกติเป็นแบบเดลต้า โดยการใช้สวิตช์สองทำงานต่อเป็นแบบสตาร์ ตอนเริ่มเดินมอเตอร์ และเป็นแบบเดลต้าเมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ ประโยชน์ของการต่อ

แบบสตาร์ทตอนเริ่มเดินมอเตอร์จะทำให้กระแสเริ่มหมุน ( $I_s$ ) ลดลง 1/3 เท่าของการต่อแบบเดลต้า เข้ากับแหล่งจ่ายโดยตรง และค่าแรงบิดเริ่มต้นหมุนจะมีค่าลดลง 1/3 เท่าด้วย วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะมีราคาถูก และสะดวก

## 2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Speed Control of Induction Motors)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่คงที่ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ความเร็วของมอเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (Slip) เมื่อมีการจ่ายภาระทางกล ในการใช้งานอาจมีความต้องการความเร็วมอเตอร์ที่หลากหลายหรือปรับค่าได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าสลิป และความเร็วซิงโครนัส จากสมการการ  $n_r = (1-s)n_s$  ปรับความเร็วของมอเตอร์จะมีอยู่ 2 วิธีพื้นฐานคือ การควบคุมความเร็วซิงโครนัส และการควบคุมค่าสลิปโดยที่ความเร็วซิงโครนัสคงที่ การควบคุมความเร็วซิงโครนัสกระทำได้โดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก หรือการควบคุมความถี่ของสเตเตอร์ และสำหรับการควบคุมค่าสลิปสามารถกระทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ หรือการควบคุมความต้านทานของวงจรรอเตอร์

1) การเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์วิธีการนี้ใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกเท่านั้นเป็นวิธีการที่ง่ายโดยที่ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผกผันกับจำนวนขั้วแม่เหล็ก จำนวนขั้วแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนได้อัตราส่วน 2:1 เท่านั้นโดยการเปลี่ยนแปลงการต่อขดลวดสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ก) มี 4 ขั้วแม่เหล็กสำหรับความเร็วต่ำ และในรูปที่ 2.21 ข) มี 2 ขั้วแม่เหล็กสำหรับความเร็วสูง

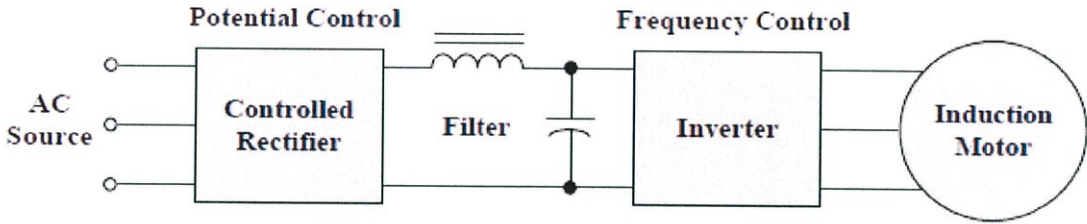


รูปที่ 2.18 วิธีการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก

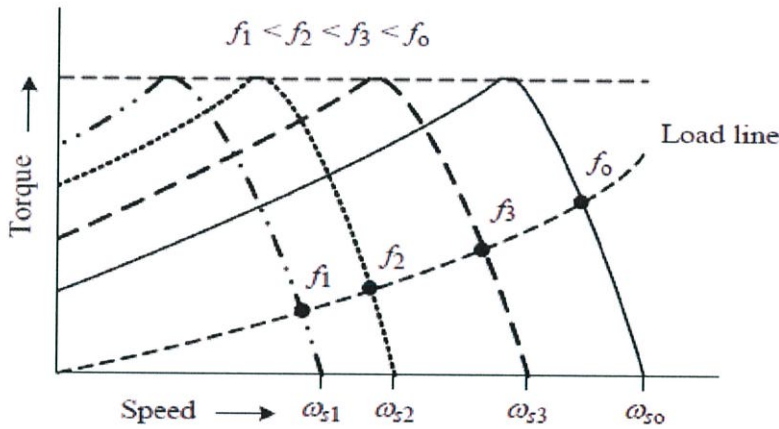
2) การควบคุมความถี่ของสเตเตอร์ วิธีการนี้ใช้ได้กับทั้งมอเตอร์ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก และแบบพันขดลวดความเร็วซิงโครนัสสามารถเปลี่ยนได้อย่างต่อเนื่องโดยการเปลี่ยนความถี่ของสเตเตอร์โดยใช้วงจรควบคุมดังรูปที่ 2.22 จากสมการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ ถ้าต้องการให้ค่าแรงบิดของมอเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง จะต้องทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ มีค่าคงที่เท่ากับพิกัดไม่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.23 และอีกทั้งยังเป็นการป้องกันไม่ให้

วงจรแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวเมื่อมีการลดความถี่ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อมอเตอร์เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นโดยสามารถจะกระทำได้โดยการทำให้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่มีค่าคงที่ในช่วงลดความถี่ต่ำกว่าพิกัด

$$\frac{V_1}{f} = 4.44 N_{ph} A_c B_m = k_m B_m \tag{2-45}$$

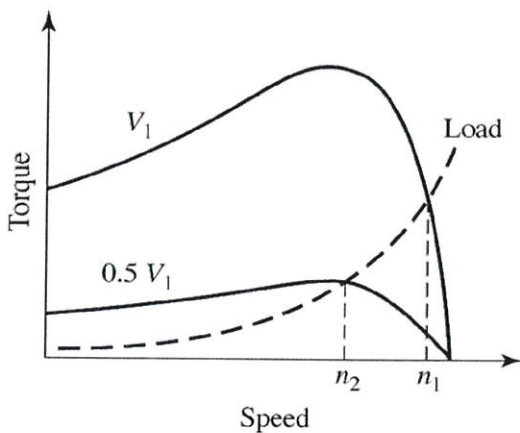


รูปที่ 2.19 การควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.20 ค่าแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ และแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

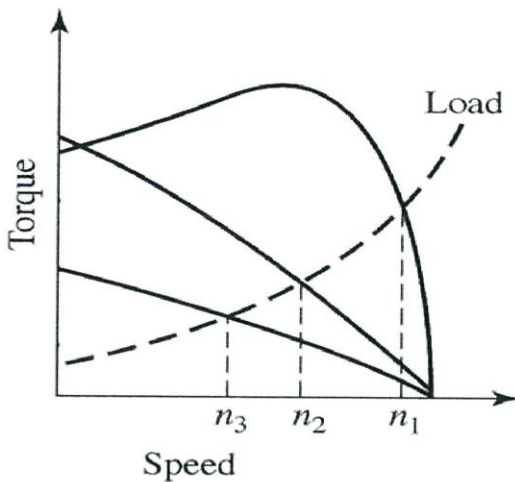
3) การควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ วิธีการนี้ใช้ลดหรือเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์



ได้ไม่เกินพิกัดเท่านั้น จะเห็นได้ว่าแรงบิดทำงานแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์จะแปรผันตามแรงดัน ยกกำลังสอง การลดแรงดันจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงอย่างมาก เช่น ถ้าลดแรงดันเหลือครึ่งหนึ่งแรงบิดจะลดเหลือเพียงหนึ่งในสี่ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสมสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกขนาดเล็ก

รูปที่ 2.21 การปรับความเร็วโดยการควบคุมแรงดัน

4) การควบคุมความต้านทานของวงจรรอเตอร์ วิธีการนี้ใช้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มี



โรเตอร์แบบพันขดลวดเท่านั้นโดยการนำค่าความต้านทานภายนอกที่ปรับค่าได้มาต่ออนุกรมกับโรเตอร์  $R_2$  ซึ่งจะทำให้เส้นโค้งคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.25 มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 2.17

**รูปที่ 2.22** การปรับความเร็วโดยการปรับความต้านทานของโรเตอร์

ในการพิจารณาเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำไปใช้งาน จะต้องคำนึงถึงความสามารถของเครื่องจักร และคุณลักษณะของภาระทางกลในด้านความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ และแรงบิด ตัวอย่างเช่น

- ภาระทางกลที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว ได้แก่ พัดลมดูดอากาศ บั๊มแรงเหวี่ยง แบบนี้ไม่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหมุนที่สูง แต่แรงบิดจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วยกกำลังสอง
- ภาระทางกลที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว และแรงโน้มถ่วง ได้แก่ รถไฟฟ้า แบบนี้ต้องการแรงบิดเริ่มต้นหมุนที่สูง
- ภาระทางกลที่ต้องการแรงบิดคงที่ ได้แก่ การขับเคลื่อนวัตถุต่าง ๆ เช่น กระดาษพลาสติก และเหล็ก

สำหรับระบบป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะทำงานสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการทำงานของมอเตอร์ โดยที่ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นนั้นมาจากอุณหภูมิขณะทำงานมีค่าสูงมากซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดค่ากระแสที่สูงเนื่องจากการอึดตัวของแกนเหล็ก การจ่ายภาระทางกลเกินพิกัดกำลังหรือการลัดวงจร อีกทั้งอาจเกิดขึ้นจากมอเตอร์มีการสั่นสะเทือนมากหรือมีความเร็วที่สูงเกินไป ดังนั้นระบบป้องกันมอเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สามารถปลดมอเตอร์ออกจากระบบเมื่อเกิดกระแสเกินพิกัด (Over Current) กระแสลัดวงจร (Short-Circuit Current) แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด (Over Voltage) หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด (Under Voltage) เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker CB) ฟิวส์ (Fuse) รีเลย์ป้องกันการทำงานเกินกำลังไฟฟ้า (Overload Relay) เป็นต้น

## 2.7 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ธันวาคม 2551

ข้อมูลคุณภาพที่การไฟฟ้ากำหนดไว้กับลูกค้า  
ระดับแรงดันที่จุดต่อเชื่อม

- ในระบบของ กฟผ. ในสภาวะปกติระดับแรงดันจะถูกควบคุมไว้ที่ระดับไม่เกิน  $\pm 5\%$  ของ Nominal Voltage และในช่วงผิดปกติแรงดันอาจเบี่ยงเบนไปถึง  $\pm 10\%$
- ในระบบของ กฟภ. ในสภาวะปกติระดับแรงดันจะถูกควบคุมไว้ที่ระดับไม่เกิน  $\pm 5\%$  ของ Nominal Voltage และในช่วงผิดปกติแรงดันอาจเบี่ยงเบนไปถึง  $\pm 10\%$
- ในระบบของ กฟน. แยกตามแรงดันไฟฟ้า

### ตารางที่ 2.2 ระดับแรงดันที่สภาวะปกติ และสภาวะฉุกเฉิน

สภาวะ	115 KV	69 KV	24 KV	12 KV
ปกติ	-1.74%,+2.61% 113.0-118.0 KV	-1.74%,+2.90% 67.0-71.0 KV	-1.91%,-1.67% 21.8-23.6 KV	-0.96%,-1.67% 10.9-11.8 KV
ฉุกเฉิน	-1.74%,+6.96% 113.0-123.0 KV	-1.74%,+5.07% 67.0-72.5 KV	-2.09%,0.00% 21.6-24.0 KV	-1.04%,0.00% 10.8-12.0 KV

ความถี่ของระบบในสภาวะปกติไม่เกิน 50 Hz  $\pm$  0.5 Hz ยกเว้นกรณีเกิดเหตุผิดปกติหรือเหตุฉุกเฉิน

แรงดัน และกระแสผิดเพี้ยน (Voltage and Current Distortion) การไฟฟ้ากำหนดให้ลูกค้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายที่ใช้อุปกรณ์ที่เป็นชนิด Non-Linear Load ต้องควบคุม Harmonic distortion ไม่เกินระดับที่กำหนดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อลูกค้ารายอื่น ๆ ชีตจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกส์เป็นค่าขีดจำกัดของทั้งแต่ละอันดับ และค่าความเพี้ยนรวม ( $V_T$ ) ที่ลูกค้าต้องไม่ทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์ที่จุดซื้อไฟเกินกำหนดดังแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อรวม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

### ตารางที่ 2.3 ความผิดเพี้ยนของแรงดัน

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อรวม (KV)	ค่าความเพี้ยนของ แรงดัน รวม $V_T$ (%)	ค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกส์แต่ละ อันดับ(%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.4	5	4	2
11,12,22,24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

$$V_T = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{19} [V_n]^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2-46)$$

$V_T$  = ค่าความเพี้ยนของแรงดันรวม  $V_T$  (%)

$V_1$  = แรงดัน Fundamental (ที่ความถี่ 50 Hz)

$V_n$  = แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกเป็นค่าขีดจำกัดของแต่ละอันดับมีหน่วยเป็นแอมแปร์ที่ลูกค้าต้องไม่ทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่จุดซื้อไฟไหลเข้าระบบของการไฟฟ้าเกินกำหนดดังแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ซื้อไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วมยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อน 10% หรือ 0.5 แอมแปร์ (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

**ตารางที่ 2.4** อันดับฮาร์มอนิก และขีดจำกัดของกระแส

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม (KV)	MVA <sub>sc</sub> (Base)	อันดับฮาร์มอนิก และขีดจำกัดของกระแส (A rms)																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.4	10	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11,12	100	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22,24,33	500	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	500	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 และมากกว่า	1000	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

ค่า MVA<sub>sc</sub> ที่จุดต่อรวมคำนวณจากสมการดังนี้

$$MVA_{sc} = \sqrt{3}V_{L-L}I_{sc} \quad (2-47)$$

$V_{L-L}$  = แรงดันไฟฟ้า Line-to-line ที่จุดต่อรวม [kV]

$I_{sc}$  = กระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่จุดต่อรวม [kA]

หากค่า  $MVA_{sc}$  ต่ำสุดที่จุดต่อร่วมมีค่าแตกต่างจากค่า  $MVA_{sc}$  (Base) ที่ระบุในตารางยอมให้ปรับค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบด้วยสมการ

$$I_h^1 = I_h \left( \frac{MVA_{sc}^1}{MVA_{sc} \text{ (Base)}} \right) \quad (2-48)$$

$I_h^1$  = ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  ที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบเมื่อค่า  $MVA_{sc}$  เป็น  $MVA_{sc}^1$  [A]

$I_h$  = ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  ที่กำหนดในตาราง [A]

$MVA_{sc}$  = ค่า  $MVA_{sc}$  ต่ำสุดที่จุดต่อร่วมมีค่าไม่เท่ากับค่า  $MVA_{sc}$  (Base) [MVA]

$MVA_{sc}$  (Base) = ค่า  $MVA_{sc}$  (Base) สำหรับขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกในตาราง [MVA]

## 2.8 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

นิยามของแรงดันไฟฟ้าตกหรือ Under Voltage ที่ให้ไว้โดย IEEE Std. 1100-1992 คือการลดลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ณ ความถี่กำลังไฟฟ้า (50Hz) เป็นช่วงเวลามากกว่า 2-3 วินาทีแรงดัน Sag เองก็จัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้าตก

เช่นกันแต่แยกแรงดัน Sag ออกไปต่างหากจากนิยามของแรงดันไฟฟ้าตก (Under Voltage) สำหรับสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องแรงดันไฟฟ้าตกสามารถจำแนกออกได้ 2 สาเหตุใหญ่

- ระยะห่างระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้า (สถานีการไฟฟ้า) กับระบบงานมีมากเกินไป ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ตามสายตัวนำ

- เกิดจากโหลดที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงผลกระทบจากปัญหาในเรื่องแรงดันไฟฟ้าตกส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูงเกินขีดปกติที่มอเตอร์ไฟฟ้าหรือสามารถส่งผลให้ระบบงานหยุดทำงาน (Shutdown) ได้เป็นต้น

## 2.9 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

นิยามของแรงดันไฟฟ้าเกินหรือ Over Voltage หากอ้างอิง IEEE Std. 1100-1992 จะได้ว่า การเพิ่มสูงขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแส-สลับ (AC) ที่ความถี่กำลังไฟฟ้า (50 Hz) โดยมีช่วงเวลาการเกิดขึ้นนานมากกว่า 2-3 วินาทีหากไม่สนใจนิยามแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) ที่ให้ไว้โดย IEEE Std. 1100-1992 ซึ่งเราจะให้ความสนใจแต่เพียงค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าค่าระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเพียงเท่านั้นผลที่ตามนั้นก็คือ จะเกิดความหลากหลายเป็นอย่างมากสำหรับลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเกินไม่ว่าจะเป็นลักษณะของรูปคลื่นซึ่งมีทั้งลักษณะทรานเซียนต์หรือเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ (ไมโครวินาที-มิลลิวินาที) และลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นช่วงเวลานาน ๆ (มากกว่าครึ่งไซเคิล-3วินาที) นอกจากลักษณะของรูปคลื่นที่แตกต่างกันไปแล้วแหล่งก่อกำเนิดหรือสาเหตุก็ยังมี ความแตกต่างกันไปอีกด้วยด้วยความหลากหลายของลักษณะแรงดันไฟฟ้าเกินจึงจำเป็นที่จะต้อง กำหนดนิยามลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเกินที่มีความแตกต่างกันออกไปตัวอย่าง เช่น แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่า (หรืออื่น ๆ) ปรากฏตามสายตัวนำจะเรียกว่าไฟกระชอก (Surge) แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าของวัสดุเก็บพลังงานไฟฟ้าเมื่อเกิดการ พอลต์จะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะฟื้นตัวกลับ (Transient Recovery Voltage) เป็นต้นเหตุที่ จะต้องจำแนกแรงดันไฟฟ้าเกินออกมาเป็นชนิดต่างคือ เพราะว่าเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในงานการ ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินแต่ชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันนั่นเองตัวอย่างเช่นการนำ MOV กับรีเลย์ ป้องกัน (Relay Protection) มาใช้ในงานการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินโดยตัว MOV จะทำหน้าที่ เบี่ยงเบน (Diverter) ทิศทางการไหลของกระแสหรือมีความสามารถ Clamping แรงดันไฟฟ้าเกินได้ ในช่วงเวลาสั้น ๆ (ไฟ-กระชอก, Spike หรือทรานเซียนต์นั่นเอง) ได้อย่างมีคุณภาพแต่ถ้าหาก แรงดันไฟฟ้าเกินที่ปรากฏขึ้นมีคาบเวลาในการเกิดนาน ๆ (วินาที) ตัว MOV ก็จะได้รับ ความเสียหาย (ระเบิด) ในที่สุดแต่ถ้าเป็นตัวรีเลย์ป้องกันจะสามารถทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินที่มีคาบเวลา การเกิดนานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในทางกลับกันถ้าแรงดันไฟฟ้าเกินมีลักษณะการเกิดใน ช่วงเวลาสั้น ๆ (ไฟกระชอก) ตัวรีเลย์ป้องกันจะมีผลการตอบสนองต่อการปรากฏขึ้นได้ไม่ไวพอ และ ตัวรีเลย์ป้องกันเองสามารถได้รับความเสียหายได้จากเหตุผล จากตัวอย่างที่ยกขึ้นมาสนับสนุนจึงเป็น เรื่องที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจำแนกลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเกินออกเป็นชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การวางแผนทางการป้องกันอย่างเกิดประสิทธิผลโดยไม่ก่อให้เกิดการทับซ้อนของปัญหา อันนำไปสู่การสูญเสียงบประมาณโดยไม่เกิดประสิทธิภาพสำหรับสาเหตุของการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน (ยึดแรงต่ำ) สามารถจำแนกได้ 2 สาเหตุใหญ่ ๆ ด้วยกันได้แก่การเกิดกราวด์พอลต์ และการหยุด ทำงานของโหลดหรือระบบงานขนาดใหญ่การเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินจาก 2 สาเหตุดังกล่าวนี้ส่งผล กระทบโดยตรงต่อวัสดุประเภท Surge Arrester ทั้งหลาย (ภาคอินพุทของเครื่อง UPS, Stabilizer เป็นต้น)

## 2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

การเกิดความผิดปกติหรือ ฟอลต์ (Fault) คือ การเกิดความผิดปกติที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ ผลกระทบจากการเกิดฟอลต์นั้นอาจจะเพียงแค่ทำให้ไฟกระพริบ ไฟตก หรืออาจจะมากจนถึงไฟฟ้าดับได้ซึ่งบริเวณที่มีการเกิดฟอลต์มากที่สุดคือ สายไฟขาด ในอากาศมากถึง 50% ของสาเหตุทั้งหมดเลยทีเดียว ฟอลต์นั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้สองประเภทคือ ความผิดปกติแบบอนุกรม (Series Fault) ซึ่งจะเกิดจากการที่มีการเปิดวงจร เช่น สายไฟขาดหรือหลุด หรืออุปกรณ์บางอย่างหลุดตั้งนั้นจึงเรียกความผิดปกติชนิดนี้ได้อีกอย่างว่า ความผิดปกติแบบเปิดวงจร (Open-Circuit Faults) ซึ่งฟอลต์ชนิดนี้มีโอกาสเกิดได้น้อยมาก การเกิดฟอลต์อีกชนิดหนึ่งนั้นคือ ความผิดปกติแบบขนาน (Shunt Fault) ความผิดปกติชนิดนี้เกิดจากการลัดวงจรซึ่งสามารถแยกย่อยไปอีกหลายแบบเราอาจจะเรียกความผิดปกติชนิดนี้ได้อีกอย่างว่า ความผิดปกติแบบลัดวงจร (Short Circuit Fault) ฟอลต์ชนิดนี้มีโอกาสเกิดมากกว่าชนิดแรก และมีความรุนแรงมากกว่าตั้งนั้น เราจะสนใจศึกษาฟอลต์ชนิดนี้ฟอลต์ขนานหรือฟอลต์ลัดวงจรมัน มีหลายชนิดด้วยกัน สามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทคือ ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) และ ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) ซึ่งฟอลต์แบบไม่สมมาตรนั้นก็ยังมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ลัดวงจรชนิดเส้นเดียวลงกราวด์ (Single Line To Ground Fault) , ลัดวงจรชนิดระหว่างสองเส้น (Line To Line Fault) , ลัดวงจรชนิดระหว่างสองเส้นลงกราวด์ (Double Line To Ground Fault) สำหรับฟอลต์แบบสมมาตรนั้นก็จะมีการลัดวงจรชนิดสามเฟส (Three Phase Fault) , ลัดวงจรชนิดสามเฟสลงกราวด์ (Three Phase To Ground Fault) เป็นต้น

## 2.11 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะความถี่ผิดปกติ

ความถี่ของระบบไฟฟ้าแตกต่างกันไปตามประเทศพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นที่ 50 หรือ 60 Hz บางประเทศมีส่วนผสมของความถี่ 50 Hz และ 60 Hz เช่นพลังงานไฟฟ้าในประเทศญี่ปุ่น ประเทศไทยใช้ความถี่ 50 Hz หรือ 50 รอบต่อวินาที หรือไฟฟ้าวิ่งจากโรงไฟฟ้ามาบ้านผู้ใช้ไปกลับ 50 ครั้งต่อวินาที

### 2.11.1 ผลกระทบที่ความถี่ต่ำ

ความถี่ต่ำทำให้ภัยในการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการยก การบิด , การกลิ้ง และมอเตอร์ชนิดจุดสำหรับการขนส่งเช่นรถไฟ อย่างไรก็ตามความถี่ต่ำยังทำให้เกิดการกระพริบที่เห็นได้ชัดเจนในหลอดไฟอาร์ค และหลอดไส้ การใช้ความถี่ที่ต่ำ ๆ ยังให้ประโยชน์จากการลดการสูญเสียความต้านทานซึ่งเป็นสัดส่วนกับความถี่ แต่เดิมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่น้ำตกไนแอการาผลิตไฟฟ้า 25 Hz เพื่อประนีประนอมระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อการลากความถี่ต่ำในขณะที่ยังช่วยให้หลอดไฟในการทำงาน (แม้ว่าจะมีการกระพริบที่เห็นได้ชัด) ส่วนใหญ่ของลูกค้ำที่อยู่อาศัย และเชิงพาณิชย์ที่ใช้ 25 Hz ถูกแปลงเป็น 60 Hz ในปลายปี 1950 ไฟฟ้าความถี่ 16.7 Hz (เดิม  $16\frac{2}{3}$  Hz) ก็ยังคงใช้ในบางระบบของรถไฟในยุโรปเช่นในประเทศออสเตรีย , เยอรมนี , นอร์เวย์ , สวีเดน และสวิสเซอร์แลนด์

การใช้งานนอกชายฝั่ง , การทหาร , อุตสาหกรรมสิ่งทอ , ในทะเล , คอมพิวเตอร์เมนเฟรม , เครื่องบิน และยานอวกาศบางครั้งใช้ 400 Hz เพื่อประโยชน์ของน้ำหนักที่ลดลงของอุปกรณ์หรือเพิ่มความเร็วมอเตอร์

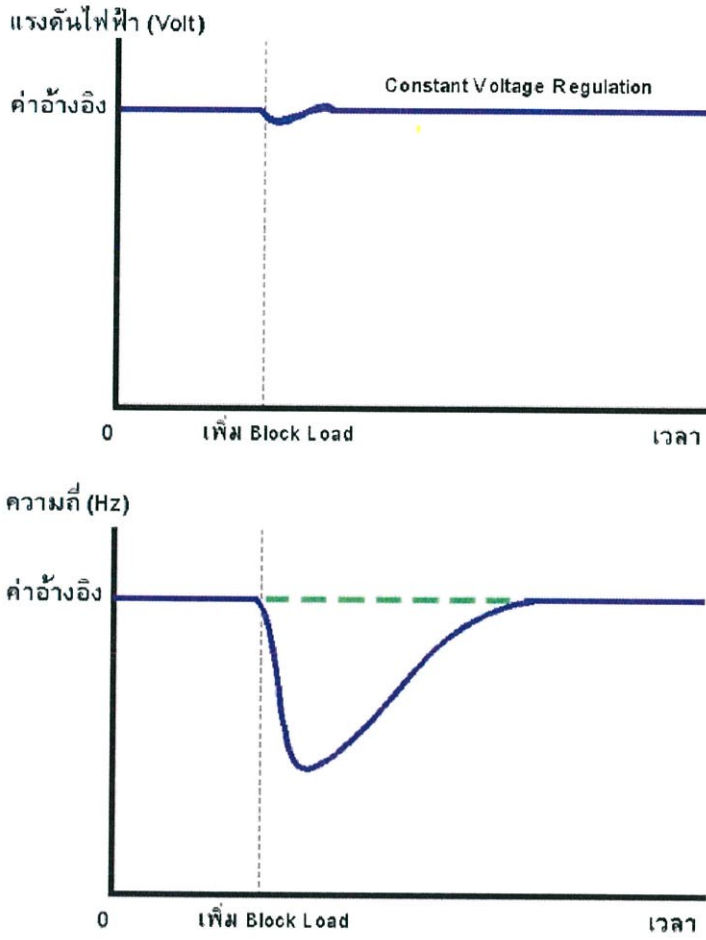
### 2.11.2 ผลกระทบที่ความถี่สูง

กระแสตรงไหลอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของขดลวด กระแสสลับที่ความถี่ใด ๆ ถูกบังคับให้ไหลห่างจากใจกลางขดลวดให้ไปอยู่ผิวนอก เพราะการเร่งความเร็วของประจุไฟฟ้าใน กระแสสลับสร้างคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลงการแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าให้ออกไปจาก กึ่งกลางของวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Skin Effect

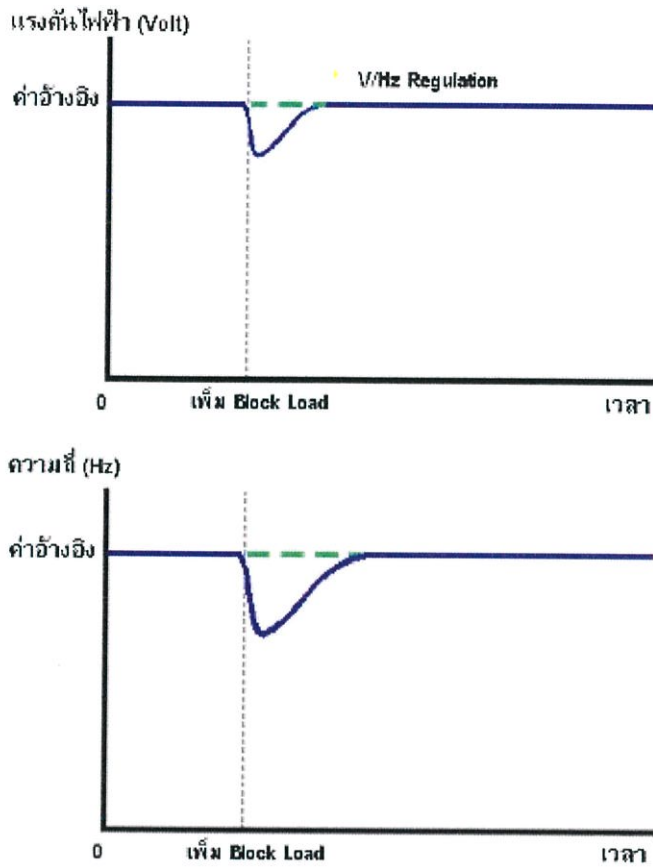
ที่ความถี่สูงมาก ๆ กระแสจะไม่ไหลในเส้นลวด แต่ไหลบนพื้นผิวของลวดภายใน ความหนาของผิวเล็กน้อย ความลึกของผิวจะมีความหนาที่ทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง 63% แม้ ที่ความถี่ค่อนข้างต่ำที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า (50-60 Hz) การกระจายไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า ยังคงเกิดขึ้นในตัวนำที่หนาพอ ตัวอย่างเช่น ความลึกของผิวของตัวนำทองแดงจะอยู่ที่ประมาณ 8.57 mm. ที่ 60 Hz ดังนั้น ตัวนำที่กระแสสูงมักจะกลวงเพื่อลดมวล และค่าใช้จ่าย

เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะไหลในผิวรอบตัวนำ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำจะ ลดลง ทำให้ความต้านทานของตัวนำในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสูงขึ้น เพราะความต้านทานจะ แปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ความต้านทาน AC มักจะสูงกว่าความต้านทาน DC มาก ก่อให้เกิดการ สูญเสียพลังงานที่สูงขึ้นมากเนื่องจากปรากฏการณ์ Ohmic Heating (หรือเรียกว่าการสูญเสีย  $I^2R$ )

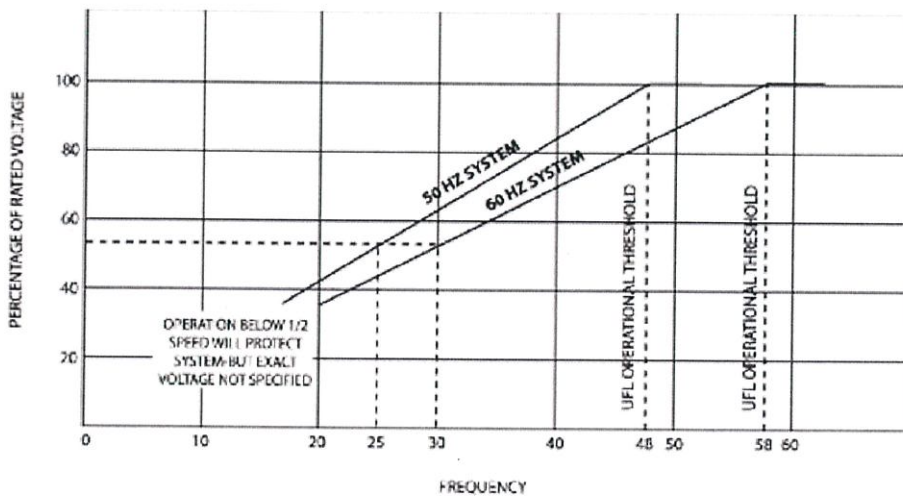
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการรับภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ จะทำให้ความเร็วรอบลดลง และอาจทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงไปพร้อมกัน ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ลดลงจะส่งผลให้ค่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงไปอีก AVR จะพยายามปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้กลับสู่ค่าอ้างอิง จึงทำ การเพิ่มกระแสกระตุ้น และถ้าเครื่องยนต์ไม่สามารถเพิ่มกำลังขั้วหมุนได้ทัน ก็จะทำให้กระแสกระตุ้น มีค่าเพิ่มขึ้นจนเกิด Over-Excitation ดังนั้น อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ จึงควรมีฟังก์ชัน Volt-per-Hertz Limiter เพื่อควบคุมให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไฟฟ้า เมื่อพยายามรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่



รูปที่ 2.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไฟฟ้า เมื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงด้วยสัดส่วนคงที่



รูปที่ 2.25 แสดงการใช้ฟังก์ชัน Under-Frequency Limit หรือ Volt-per-Hertz เมื่อค่าความถี่ไฟฟ้าต่ำกว่าที่กำหนด

## 2.12 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่าฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Second Harmonic)

ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ เข้าด้วยกัน

ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Component) คือ ส่วนประกอบของอันดับฮาร์โมนิกส์ที่มากกว่าหนึ่งของปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งแสดงในรูปของอันดับ (Order) และค่า RMS ของอันดับนั้น

ปริมาณรวมฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Content) คือ ปริมาณที่ได้จากการหักค่า DC และส่วนประกอบความถี่หลักมูลจากปริมาณเป็นคาบที่ไม่อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave)

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์เฉพาะ (Individual Harmonic Distortion , IHD) หรือ อัตราส่วนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Component) ต่อค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion , THD ) คือ อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบ ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการ (1) และ (2)

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \quad (2-49)$$

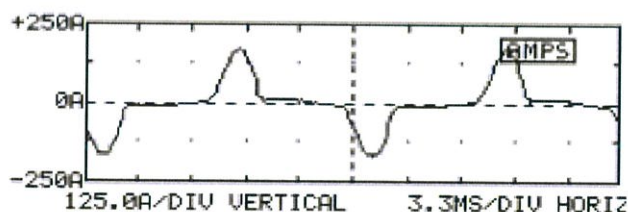
$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \quad (2-50)$$

### 2.12.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติ การไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น ( Nonlinear Load ) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ กระแสฮาร์มอนิกส์นั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเอง และระบบไฟฟ้าข้างเคียง ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์จะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่าง ๆ ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง อาจไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่น ๆ และอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นเรามีความเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเรานั้น มีโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์หรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ เพื่อที่ทำความใจก่อนที่จะทำการแก้ไข และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์ต่อไป เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

#### 1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน

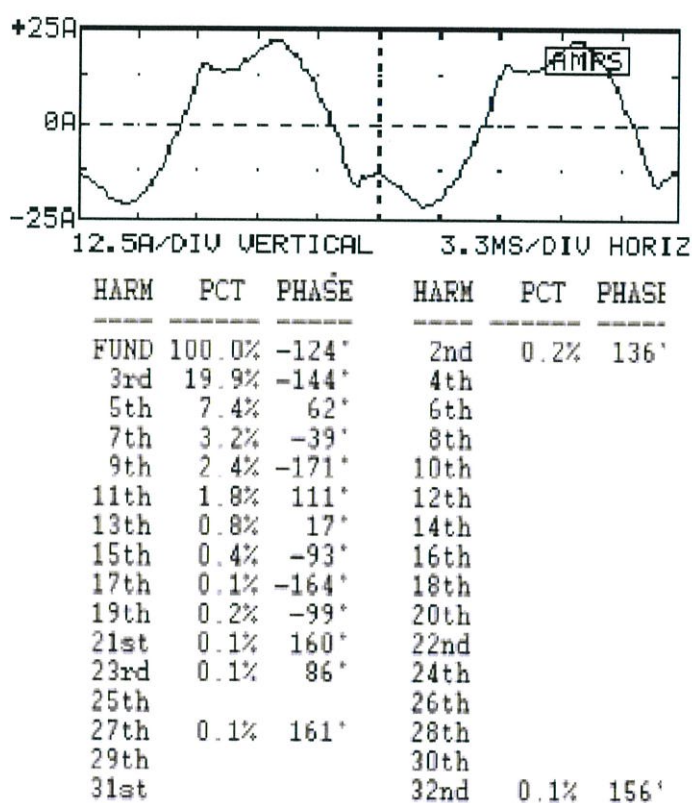
- อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง (SWITCHING MODE POWER SUPPLY : SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)



HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-124°	2nd	0.2%	136°
3rd	19.9%	-144°	4th		
5th	7.4%	62°	6th		
7th	3.2%	-39°	8th		
9th	2.4%	-171°	10th		
11th	1.8%	111°	12th		
13th	0.8%	17°	14th		
15th	0.4%	-93°	16th		
17th	0.1%	-164°	18th		
19th	0.2%	-99°	20th		
21st	0.1%	160°	22nd		
23rd	0.1%	86°	24th		
25th			26th		
27th	0.1%	161°	28th		
29th			30th		
31st			32nd	0.1%	156°

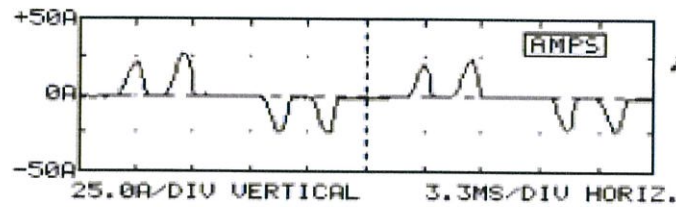
รูปที่ 2.26 ค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

- บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic Ballast )



รูปที่ 2.27 ค่าฮาร์มอนิกที่เกิดบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

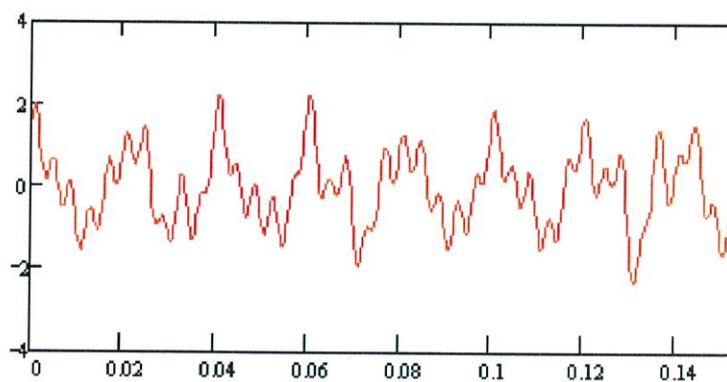
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม
  - ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier)
  - เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter)
  - ตัวโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
  - ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive)



HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-14°	2nd	3.8%	-85°
3rd	0.5%	-114°	4th	3.5%	-103°
5th	79.5%	145°	6th	0.3%	25°
7th	66.0%	124°	8th	2.5%	55°
9th	2.7%	11°	10th	1.7%	68°
11th	36.0%	-92°	12th	1.2%	132°
13th	21.8%	-118°	14th	1.2%	156°
15th	2.4%	22°	16th	0.3%	-136°
17th	10.4%	-23°	18th	0.8%	-92°
19th	8.0%	-79°	20th	0.9%	-117°
21st	1.4%	131°	22nd	0.5%	-105°
23rd	6.7%	39°	24th		
25th	4.5%	-2°	26th	0.3%	-12°
27th	0.9%	143°	28th	0.2%	76°
29th	3.7%	83°	30th	0.3%	42°
31st	3.1%	29°	32nd	0.4%	10°
33rd	0.4%	-110°	34th	0.1%	31°

รูปที่ 2.28 ค่าฮาร์มอนิกส์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภอาร์ค
  - เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)
  - เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
  - เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค/แบบสปอต (Arc Welding / Spot Welding)



รูปที่ 2.29 กราฟฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภอาร์ค

4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดัน และกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) และเครื่องกลไฟฟ้า (Electric Machine )

#### 2.12.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

ปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบออกเป็น 2 กรณีคือ

- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาดด้วยผลของค่าแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีขนาด และรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป
- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากมีค่า rms ของแรงดันหรือกระแสสูงขึ้นที่เกิดจากค่าฮาร์มอนิกส์ หรือมีการขยายของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์รีโซแนนซ์

#### 2.12.3 ปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าดังนี้ คือ

- ผลของฮาร์มอนิกส์เรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกส์ เป็นผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแส และแรงดันเกินปกติ

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้ค่า rms ของกระแส และความต้านทานของสายสูงขึ้น

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ Triplen ( ลำดับที่3,6,9...) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ ( Zero Sequence) ในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกส์กลุ่มนี้จะรวมกันกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล อาจทำให้สายนิวทรัลหรือหม้อแปลงเสียหายได้หากไม่มีการออกแบบรองรับไว้

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการในรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไป (derating) ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis -Loss) เพิ่มขึ้น

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดความร้อน และความเครียดไดอิเล็กตริก ( Dielectric Stress ) กับตัวคาปาซิเตอร์ อาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแส แรงดันฮาร์มอนิกส์ขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแส และแรงดันฮาร์มอนิกส์ คาปาซิเตอร์ที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มีฟิวส์ระดับต่ำเกิดขึ้น ฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนด หรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุจะเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกส์ในกรณีที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

- ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส ( Current Interruption Capacity ) ของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา  $di / dt$  มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิกส์ ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

- ผลของฮาร์มอนิกส์ทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า ( Watt - Hour Meter ) ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ ( Induction Disk) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล

- ผลของฮาร์มอนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเกิดปรากฏการณ์คือค็อกกิ้ง (Cogging) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิลเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพ และแรงบิดของเครื่องจักร

- ผลของฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารเช่นในระบบโทรศัพท์

### 2.13 การกำหนดปริมาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะไม่สมดุล

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในสภาวะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุลสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าได้จากนิยามที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ตามมาตรฐานของ IEEE Std 141 ได้ให้นิยามของเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า %PVUR ไว้ดังนี้

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

$$\%PVUR = \frac{\{|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|\}}{V_{avg}} \times 100 \quad (2-51)$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (2-52)$$

%PVUR คือ Percent Voltage Unbalanced

$V_a, V_b, V_c$  คือ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

$V_{avg}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส (V)

2.13.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะไม่สมดุล  
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะไม่สมดุล 1 เฟส  
-แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$V_b, V_c = 220\text{Volt} \quad \%PVUR = 5$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{V_a + 440}{3}$$

ตั้งสมมุติฐาน

กรณีที่ 1  $|V_{avg} - V_a| \Rightarrow \text{MAX}$

$$5 = \frac{\left[ \frac{V_a + 440}{3} - V_a \right]}{\frac{V_a + 440}{3}} \times 100$$

$$5 = \frac{100V_a + 44000 - 300V_a}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 44000 - 200V_a$$

$$205V_a = 41800$$

$$V_a = 203.9$$

กรณีที่ 2  $|220 - V_{avg}| \Rightarrow \text{MAX}$

$$5 = \frac{\left[ 220 - \frac{V_a + 440}{3} \right]}{\frac{V_a + 440}{3}} \times 100$$

$$5 = \frac{66000 - 100V_a - 44000}{V_a + 440}$$

$$5V_a + 2200 = 22000 - 100V_a$$

$$105V_a = 19800$$

$$V_a = 188.57$$

คำตอบที่ถูกต้อง  $V_a$  จะต้องน้อยกว่า  $V_{avg}$  ไม่เกิน 5 %

$$\begin{aligned} V_{avg1} &= [203 + 440] / 3 \\ &= 214.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PVUR(\%) &= [214.33 - 203.9] / 214.33 \\ &= 0.048 \Rightarrow 5\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{avg2} &= [188.57 + 440] / 3 \\ &= 209.52 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PVUR(\%) &= [209.52 - 188.57] / 209.52 \\ &= 0.099 \Rightarrow 10\% \end{aligned}$$

เห็นได้ว่ากรณีที่ 2 นั้นไม่เป็นจริง เนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น  $V_a = 203.9$  ,  $V_b = 220$  ,  $V_c = 220$

## 2.13.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสถานะไม่สมดุล 2 เฟส

-แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์

$$V_c = 220\text{Volt} \quad \%PVUR = 5$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} = \frac{2V_a + 220}{3}$$

ตั้งสมมุติฐาน

$$\text{กรณี 1 } |V_{\text{avg}} - V_a| \Rightarrow \text{MAX}$$

$$5 = \frac{\left[ \frac{2V_a + 220}{3} - V_a \right]}{\frac{2V_a + 220}{3}} \times 100$$

$$5 = \frac{200V_a + 22000 - 300V_a}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 22000 - 100V_a$$

$$110V_a = 20900$$

$$V_a = 190$$

$$\text{กรณีที่ 2 } |220 - V_{\text{avg}}| \Rightarrow \text{MAX}$$

$$5 = \frac{\left[ 220 - \frac{2V_a + 220}{3} \right]}{\frac{2V_a + 220}{3}} \times 100$$

$$5 = \frac{66000 - 200V_a - 22000}{2V_a + 220}$$

$$10V_a + 1100 = 44000 - 200V_a$$

$$210V_a = 42900$$

$$V_a = 204.3$$

คำตอบที่ถูกต้อง  $V_a$  จะต่อน้อยกว่า  $V_{\text{avg}}$  ไม่เกิน 5%

$$V_{\text{avg}} = [2 \times 190 + 220] / 3$$

$$= 220$$

$$PVUR(\%) = [200 - 190] / 200$$

$$= 0.05 \Rightarrow 5\%$$

$$V_{\text{avg}} = [2 \times 204.3 + 220] / 3$$

$$= 209.53$$

$$PVUR(\%) = [209.53 - 204.3] / 209.53$$

$$= 0.025 \Rightarrow 2.5\%$$

และ  $V_c$  (220) ก็จะต้องมากกว่า  $V_{\text{avg}}$  ไม่เกิน 5% ด้วยเช่นกัน

$$PVUR(\%) = [220 - 200] / 200$$

$$= 0.10 \Rightarrow 10\%$$

$$PVUR(\%) = [220 - 209.53] / 209.53$$

$$= 0.049 \Rightarrow 5\%$$

เห็นได้ว่ากรณี 1 ไม่เป็นเนื่องจากเราต้องการคิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5 เปอร์เซ็นต์  $V_a = 204.3$ ,  $V_b = 204.3$ ,  $V_c = 220$

หมายเหตุ สถานะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสจะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าใน 2 เฟสที่เกิดความผิดปกติมีค่าเท่ากันเพื่อให้ง่ายกับการพิจารณา

## 2.14 การคำนวณหาค่าโหลดในกรณีที่กำหนดไว้

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุต แรงบิด และอัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

$$P = T \times \omega$$

เมื่อ P คือ กำลังเอาต์พุต (W) ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด 4 KW

T คือ แรงบิด (N-m)

W คือ อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)

จาก

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi \frac{n_r}{60}$$

เมื่อ  $\omega$  คือ อัตราเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)

$n_r$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm) ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้มีค่า 1430 rpm

จะได้

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi \frac{1430}{60} \\ &= 149.75 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

เมื่อทราบขนาดมอเตอร์ที่ใช้ และอัตราเร็วรอบที่พิกัดมอเตอร์จะสามารถนำมาหาค่าโหลดได้ดังนี้

$$P = T \times \omega$$

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{4000}{149.75}$$

$$T = 26.711 \text{ (N-m)}$$

ดังนั้นค่าโหลดในกรณี Full Load คือ 26.711 N-m

### ตารางที่ 2.5 ค่าโหลดในกรณีที่กำหนดไว้

โหลด(%)	โหลด(N-m)
0	0
50	13.355
100	26.711

## 2.15 การใช้โปรแกรมเพื่อการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ MATLAB

### 2.15.1 พื้นฐานการใช้ MATLAB SIMULINK เบื้องต้น

เมื่อเข้ามาที่หน้าต่างโปรแกรม MATLAB จะเจอหน้าต่างคำสั่งเป็นหน้าต่างแรกที่พบ เมื่อเปิดโปรแกรม MATLAB การป้อนคำสั่งต่างๆ จะป้อนลงในหน้าต่างนี้ เพื่อทำการคำนวณและประมวลผลต่างๆ เป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงผลที่ได้จากการประมวลผล ยกเว้นรูปภาพซึ่งจะแยกไปแสดงผลในหน้าต่างกราฟในการป้อนคำสั่งสำหรับการประมวลผลของโปรแกรม MATLAB สามารถป้อนได้ 2 วิธีด้วยกันคือ เป็นการป้อนคำสั่งหรือค่าตัวแปรต่างๆ บนหน้าต่างคำสั่งทีละคำสั่งตามขั้นตอนของการแก้ปัญหา หรือเป็นการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และชุดคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ทำการประมวลผลตามขั้นตอนของการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาลงในไฟล์ซึ่งจะต้องเก็บไว้ด้วยนามสกุล .m โดยที่จะเรียกชุดตัวแปรและชุดคำสั่งทั้งหมดที่เขียนในลักษณะนี้ว่า โปรแกรม .m file สำหรับผู้ใช้โปรแกรมคำสั่ง MATLAB ครั้งแรก โปรแกรม MATLAB มีคำสั่งซึ่งช่วยดูลักษณะการใช้งานและความสามารถในการทำงานของโปรแกรม MATLAB และคำสั่ง Computer ซึ่งจะแสดงชนิดของเครื่อง Computer ที่เรากำลังใช้งานอยู่ในขณะนั้น นอกจากนี้ยังมีคำสั่ง Help ซึ่งจะอธิบายการใช้คำสั่งต่างๆ รวมถึงรูปแบบคำสั่งที่มีใช้ในโปรแกรม MATLAB สัญลักษณ์หนึ่งที่ช่วยย่อในโปรแกรม MATLAB คือ % สัญลักษณ์ % เมื่อเป็นตัวแรกของคำสั่งหรือข้อความใดๆ จะเป็นเครื่องหมายที่บอกให้เครื่องทราบว่าไม่ต้องทำการประมวลผลใดๆ ต่อคำสั่งหรือข้อความที่อยู่หลังเครื่องหมายนี้ วัตถุประสงค์ของการใช้เครื่องหมายนี้ก็เพื่อเป็นการเขียนคำอธิบายโปรแกรมในคำสั่ง ของบรรทัดต่อไปที่เราได้เขียนไว้ ทั้งนี้เป็นการเตือนความจำของเราเองถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม หรือผู้ที่จะนำโปรแกรมไปใช้ให้เข้าใจถึงตัวโปรแกรมที่เราเขียนนั้น หรือเรียกว่า Script file ซึ่งหมายถึงไฟล์ที่ถูกเก็บในรูปแบบของรหัส ASCII Code โดย m file หรือ Script file นี้ สามารถสร้างมาจากโปรแกรม Editor ใดๆ หรือโปรแกรม Word Processor ใดๆ ก็ได้ ในการเรียกใช้โปรแกรม m-file นี้ สามารถทำได้อย่างง่าย โดยเพียงแต่พิมพ์ชื่อของ m file โดยไม่ต้องตามด้วยนามสกุล .m ลงในหน้าต่างคำสั่งโปรแกรม MATLAB ก็จะไปทำการอ่านคำสั่งใน m file ชื่อนั้นๆ และทำการประมวลผลไปที่ละบรรทัดจนจบโปรแกรม

#### 1. การคำนวณพื้นฐาน

เมื่อพิมพ์คำสั่งการคำนวณที่เครื่องหมาย ">>" MATLAB จะทำการคำนวณแล้วจะแสดงผลคำตอบได้ทันที แบบเดียวกับเครื่องคิดเลข สมมติว่าต้องการคำนวณ  $25+90$  สามารถพิมพ์เข้าไปได้ทันทีดังนี้ >>25+90 แล้วกด Enter ซึ่ง MATLAB จะตอบออกมาทันทีในบรรทัดถัดมาว่า ans = 115 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะการเขียนประโยคคณิตศาสตร์จะเหมือนกับภาษาเขียนภาษาสูงทั่วไป โดยจะกระทำในวงเล็บก่อนแล้วค่อยทำข้างนอก



```

Command Window
>> 25+90

ans =

    115

>> 30*15.5

ans =

    465

>> 125/6*2+50

ans =

    91.6667

fx >>

```

รูปที่ 2.30 ผลที่ได้จากการคำนวณใน MATLAB

## 2. เมทริกซ์

โปรแกรม MATLAB มีการใช้ฟังก์ชันหลายๆ ตัวเพื่อสร้างเมทริกซ์พิเศษขึ้น โดยเมทริกซ์เหล่านี้ อาจมีการใช้เฉพาะงาน หรืออาจใช้ในการคำนวณตามเทคนิคการคำนวณต่างๆ โดยส่วนมากเมทริกซ์เหล่านี้มักตั้งขึ้นใกล้เคียงกับการทำงานของเมทริกซ์นั้นๆ การป้อนค่าให้กับสมาชิกในเมทริกซ์สามารถทำได้โดยสมาชิกในหนึ่งแถวจะแบ่งด้วยการเว้นวรรค (Space) แต่แต่ละแถวจะแบ่งด้วยเครื่องหมาย “ ; ” (Semicolon) หรือด้วยการกด Enter เช่น

```
>>F= [3 5 7 ; 11 17 18]; Enter
```

ตัวอย่างเช่น ต้องการหารางสุมตรคูณ ในการคิดคือให้มองตารางสุมตรคูณเป็นเมทริกซ์เกิดจาก  $P = XX^T$  เมื่อ  $X$  เป็นเวกเตอร์หลัก (Column Vector) ดังนั้นสร้างเวกเตอร์ขึ้นมาหนึ่งเวกเตอร์มีค่าจาก 1 ถึง 12 โดยใช้คำสั่งคือ

```
>>X=1:12; Enter
```

```
>>X=X' Enter
```

```
>>P=X*X' Enter
```

P=

ดังแสดงในรูป

```

Command Window
>> X=1:12;
>> X=X';
>> P=X*X'

P =

     1     2     3     4     5     6     7     8     9    10    11    12
     2     4     6     8    10    12    14    16    18    20    22    24
     3     6     9    12    15    18    21    24    27    30    33    36
     4     8    12    16    20    24    28    32    36    40    44    48
     5    10    15    20    25    30    35    40    45    50    55    60
     6    12    18    24    30    36    42    48    54    60    66    72
     7    14    21    28    35    42    49    56    63    70    77    84
     8    16    24    32    40    48    56    64    72    80    88    96
     9    18    27    36    45    54    63    72    81    90    99   108
    10    20    30    40    50    60    70    80    90   100   110   120
    11    22    33    44    55    66    77    88    99   110   121   132
    12    24    36    48    60    72    84    96   108   120   132   144

fx >> |

```

รูปที่ 2.31 แสดงตารางสูตรคูณแม่ 2 ถึงแม่ 12

### 3. SIMULINK เบื้องต้น

โปรแกรม MATLAB สามารถจำลอง ทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลา ได้โดยการใช้ Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือ Toolbox ที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB โดยจะทำงานภายใต้หน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อทางรูปภาพ (GUI) ของ Simulink เท่านั้นคำว่า Simulink มาจากคำสองคำคือ Simulation และ Link การใช้งาน Simulink จะกระทำโดยการนำ Block ในหน้าต่าง Library-Simulink มาต่อกันตามที่เราต้องการ และสามารถจำลองระบบได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้น ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง การจำลองระบบสามารถกระทำได้โดยป้อนอินพุตที่ป้อนเข้าไป

### 4. การเริ่มต้นใช้งาน

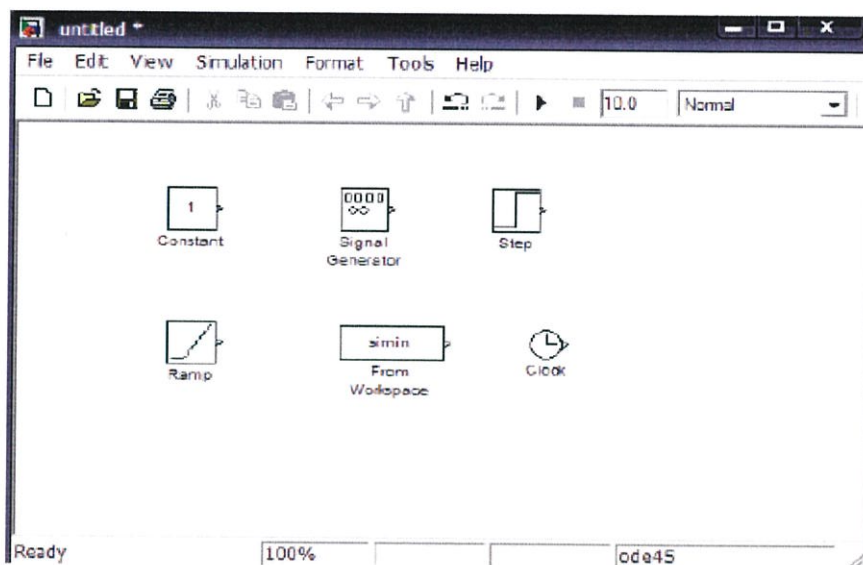
เมื่อเริ่มต้นใช้งาน Simulink โปรแกรม MATLAB จะกำหนดชื่อหน้าต่าง Simulink โดยอัตโนมัติเป็น untitled หน้าต่าง Simulink นี้จะทำงานเชื่อมต่อกับหน้าต่างคำสั่งของโปรแกรม MATLAB โดย Simulink สามารถรับส่งข้อมูลผ่าน Workspace ของหน้าต่างคำสั่ง ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันหรือ Block ที่เป็น To Workspace ตลอดจน Block ของหมวดหมู่ต่างๆ ที่ไม่ได้กำหนดค่าตัวเลข แต่กำหนดเป็นค่าตัวแปรในหน้าต่าง Simulink และเมื่อเก็บ (Save as) ระบบที่จำลองได้ด้วย Simulink โปรแกรม MATLAB จะกำหนดไฟล์ที่ทำการ Simulink เป็นชื่อไฟล์นามสกุล .mdl

### 5. บนหน้าต่าง Library Simulink

เมื่อเริ่มใช้งาน Simulink จะพบหน้าต่าง Library Simulink ที่ประกอบด้วย Block Diagram ที่เป็นโหมดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำไปใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้เพียงตัวเดียวโดดๆ ต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตัวอื่นถึงจะทำงานได้ การเลือกใช้งานโหมดใดโหมดหนึ่งในหน้าต่าง Library Simulink ให้ดับเบิลคลิกไปที่โหมดนั้นแล้วจะปรากฏหน้าต่างแสดงรายละเอียดของ Block ต่างๆ บนหน้าต่าง Library Simulink ของโหมดที่เลือกไว้ออกมา

## 6. Block Diagram โหมดต่างๆ ใน Simulink

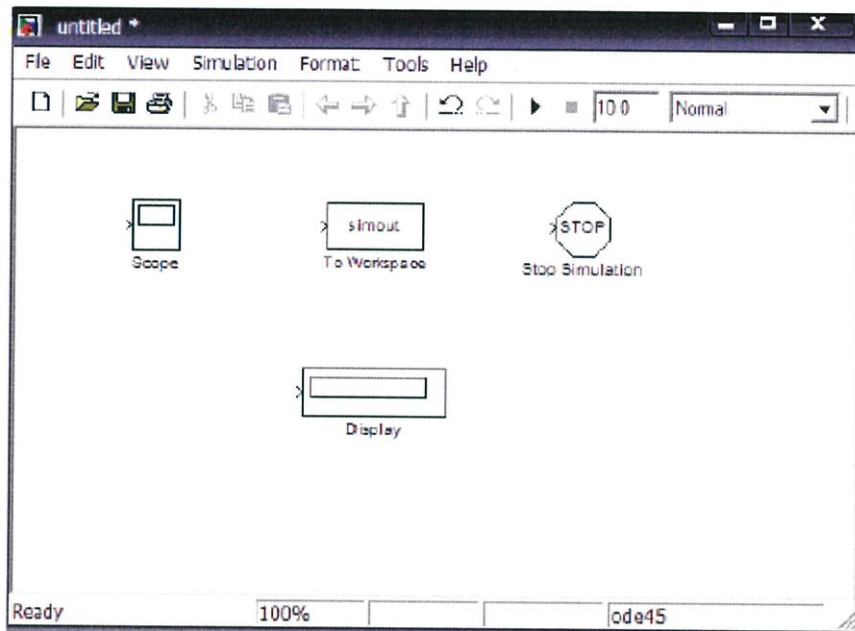
- Source



รูปที่ 2.32 Source

- Constant คือ การให้กำเนิดค่าคงที่
- Signal Generator คือ การกำเนิดสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งจากสี่สัญญาณคือ Sine, Square, Sawtooth และการกระจายที่ไม่มีรูปแบบของ Random Noise
- Step คือ การให้กำเนิด Step Function
- Ramp คือ การให้กำเนิดสัญญาณ Sine
- From Workspace คือ อ่านค่าข้อมูล (T, U) ที่เป็นเมทริกซ์จาก Workspace
- Clock คือ ให้กำเนิดเวกเตอร์เวลา

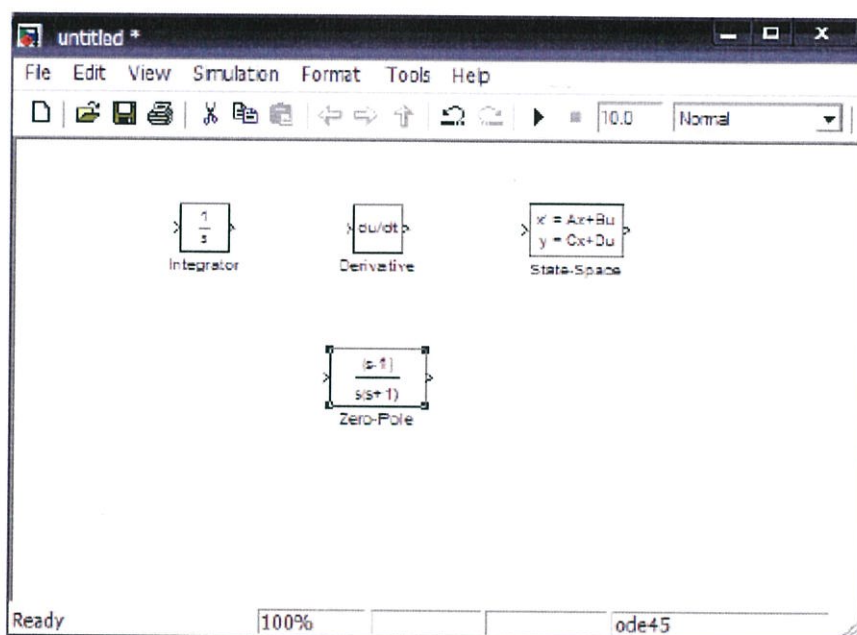
- Sinks



รูปที่ 2.33 Sinks

- Scope คือ การแสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองระบบบนออสซิลโลสโคป
- To Workspace คือ เก็บค่าข้อมูลไว้ใน Workspace
- Stop Simulation คือ หยุดการจำลองระบบเมื่อค่าอินพุตมีความแตกต่างจากศูนย์
- Display คือ การแสดงค่าข้อมูลบน Block

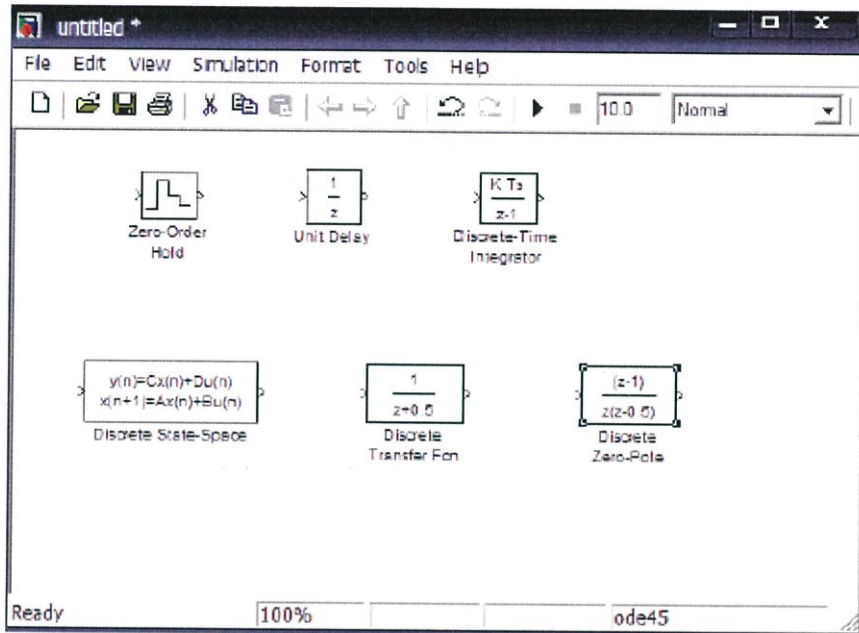
- Continuous



รูปที่ 2.34 Continuous

- Integrator คือ การอินทิเกรตสัญญาณ
- Derivative คือ การหาอนุพันธ์ในเชิงเวลาของสัญญาณ
- State-Space คือ การสร้างระบบ Line-Time Invariant ในรูปแบบ State-Space
- Zero-Pole คือ การสร้าง Transfer Function ในรูปแบบ Zero-Pole

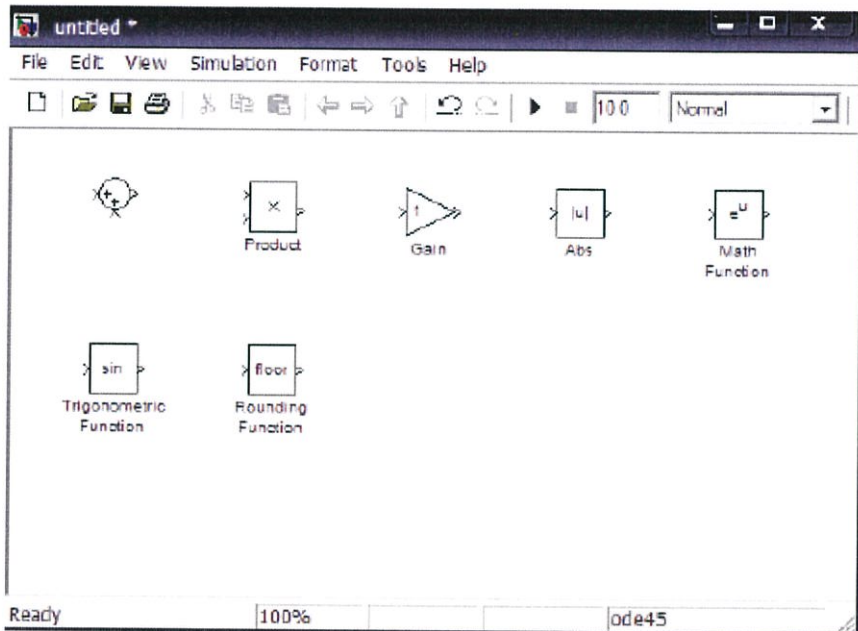
- Discrete



รูปที่ 2.35 Discrete

- Zero-Order Hold คือ การสร้างฟังก์ชัน Sample-and-Hold
- Unit Delay คือ การ Delay อินพุตไปหนึ่งคาบตัวอย่าง
- Discrete-Time Integrator คือ การสร้างอินทิเกรต Discrete-Time
- Discrete State-Space คือ การสร้างระบบ Discrete-Time ในรูปแบบ State-Space
- Discrete Transfer Fcn คือ การสร้าง Discrete-Time Transfer Function
- Discrete Zero-Pole คือ การสร้าง Discrete-Time Transfer Function ในรูป Zero-Pole



## - Math Operations



รูปที่ 2.36 Math Operations

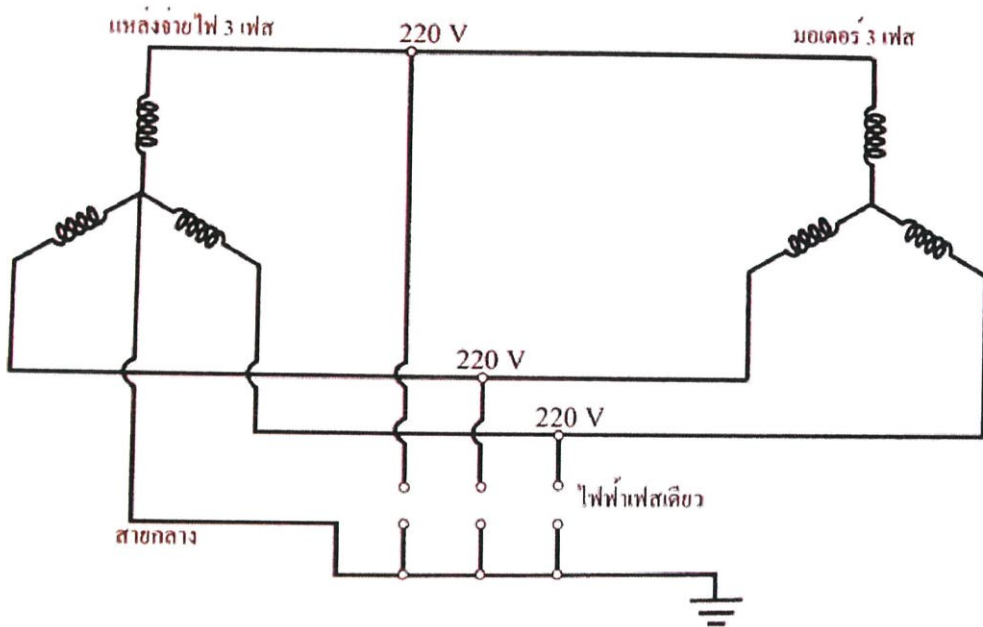
- Sum คือ การรวมผลรวมอินพุต
- Product คือ การหาค่า Dot Product ของเวกเตอร์อินพุต
- Gain คือการคูณอินพุตด้วยค่าคงที่ (Gain) ที่กำหนด
- Abs คือ การหาค่า Absolute ของอินพุต
- Math Function คือ การหาค่าฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของอินพุต
- Trigonometric Function คือ การหาฟังก์ชันตรีโกณมิติของอินพุต
- Rounding Function คือ การหาฟังก์ชันการปัดเศษของอินพุต

## 2.15.2 หน้าที่ของอุปกรณ์ในวงจร MATLAB SIMULINK

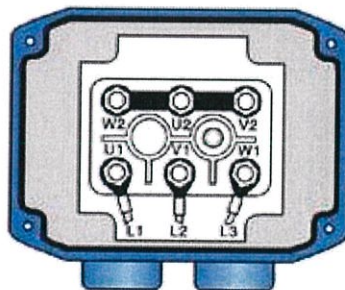
	AC Voltage Source	แหล่งจ่ายแรงดัน
	Ideal Switch	สวิตช์
	Current Measurement	โพรบวัดกระแส
	Mux	แสดงสัญญาณหลายค่าในกราฟเดียว
	Step	ควบคุมสวิตช์
	Sum	การบวกกราฟ
	Constant	ค่าคงที่
	Gain	การคูณ
	Bus Selector	เลือกแสดงค่า
	Scope	แสดงกราฟ
	powergui	ปรับตั้งการแสดงผล
	Voltage Measurement	โพรบวัดแรงดัน
	Asynchronous Machine SI Units	อินตักซ์น์มอเตอร์
	voltage source phase A	Universal แหล่งจ่ายแรงดัน

### 2.15.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองการทำงานจะใช้สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส 220/380 V เป็นแหล่งจ่ายไฟให้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 4 kw ซึ่งต่อแบบ direct online ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์ผล



รูปที่ 2.37 แสดงวงจรการต่อมอเตอร์



รูปที่ 2.38 แสดงการต่อวงจรมอเตอร์แบบ Y

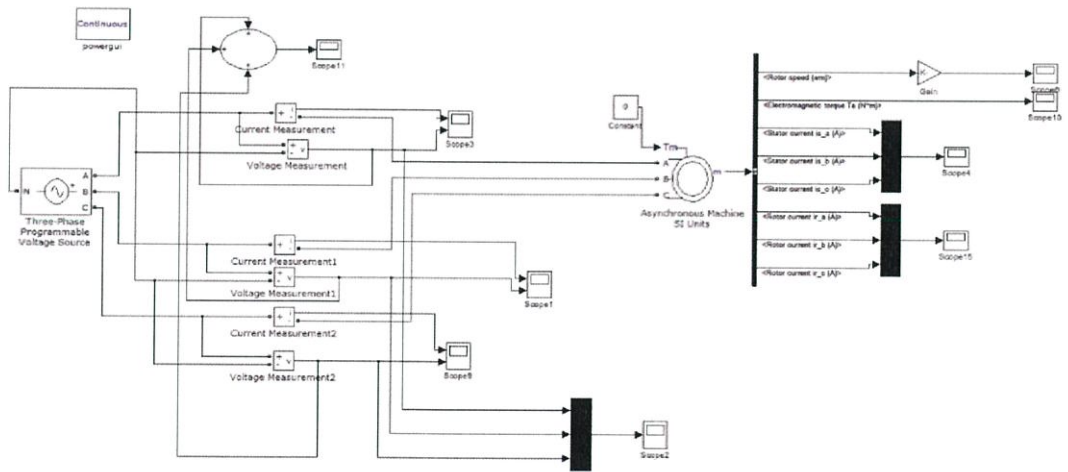
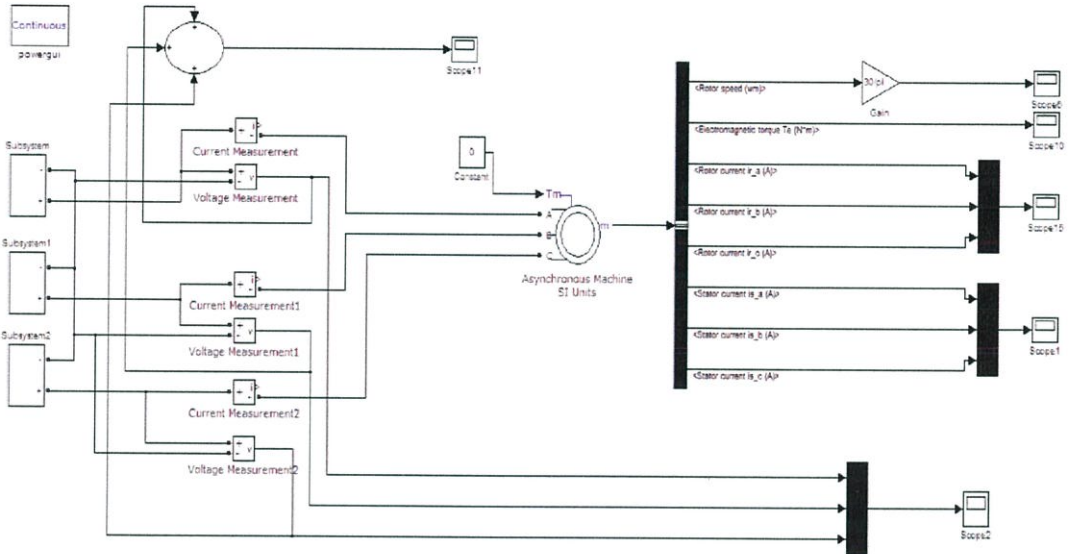
# บทที่ 3

## การทดสอบและวิธีการทดสอบ

### 3.1 การทดสอบและวิธีการทดสอบในโปรแกรม MATLAB SIMULINK

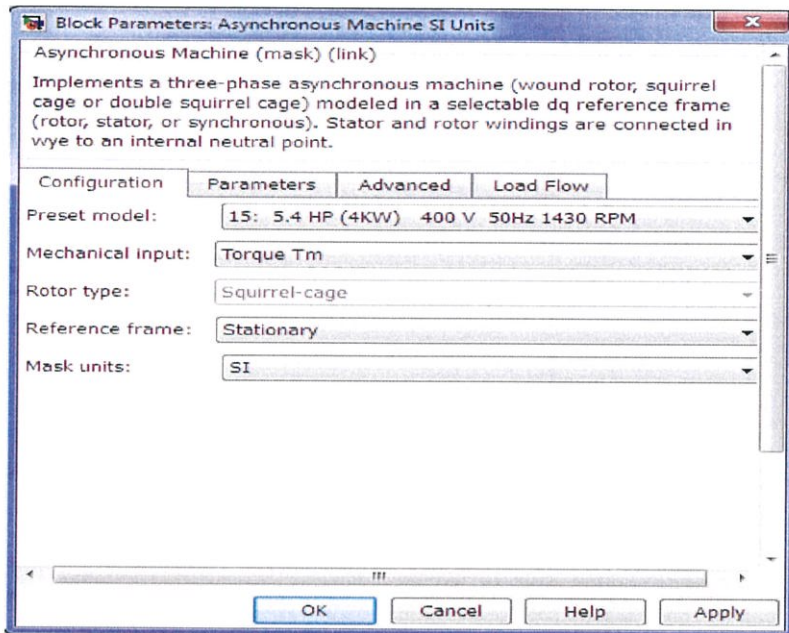
#### 3.1.1 วงจรที่ใช้ในการจำลอง

- วงจรโดยรวมที่ใช้ในการจำลอง



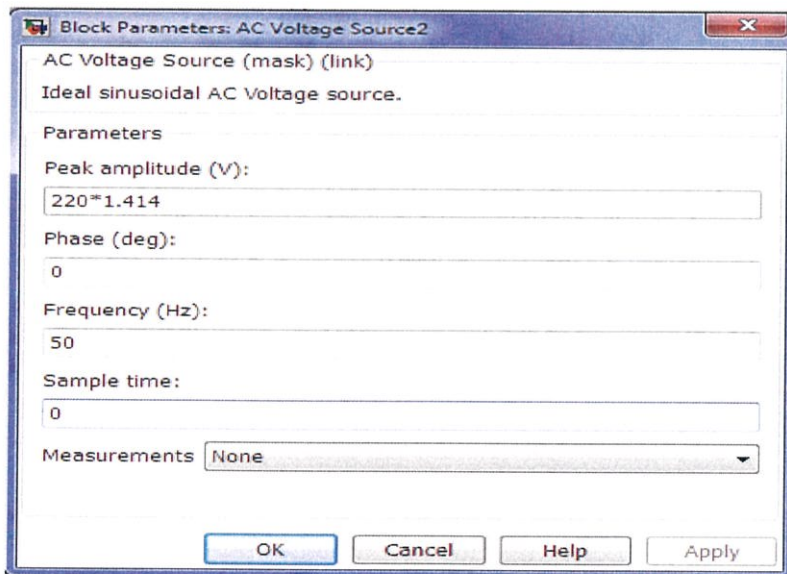
รูปที่ 3.1 วงจรโดยรวมที่ใช้ในการจำลอง

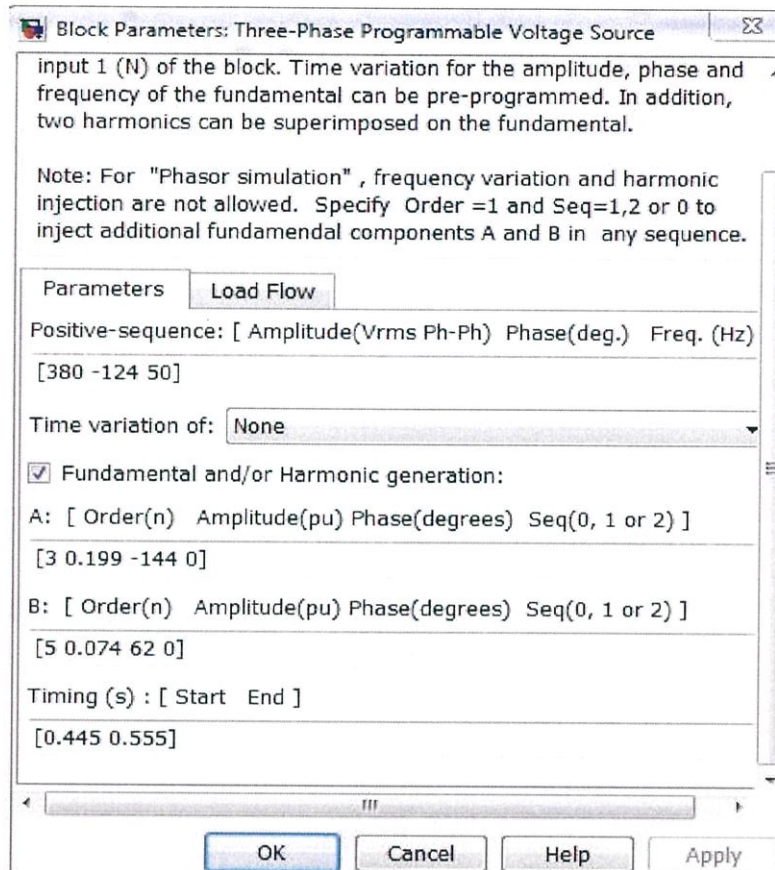
- การปรับตั้งค่าในมอเตอร์



รูปที่ 3.2 การปรับตั้งค่าในมอเตอร์

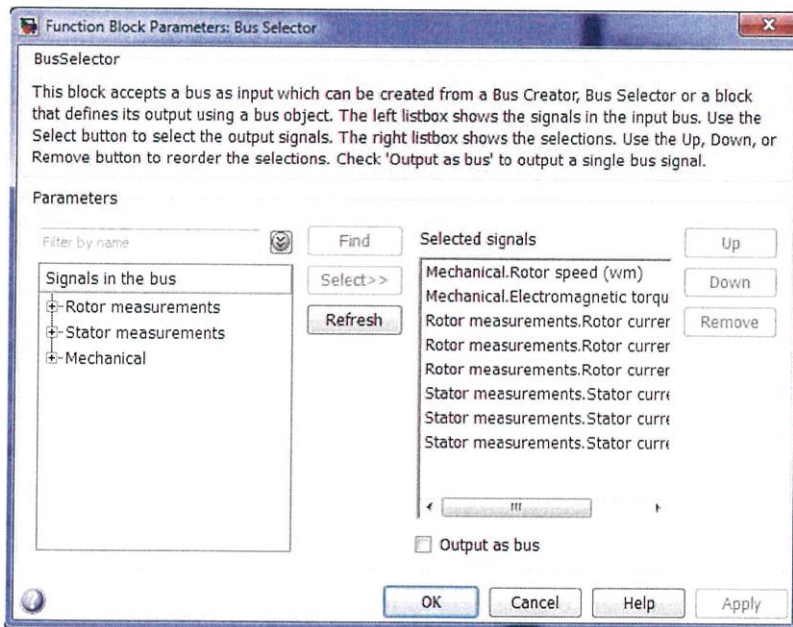
- การปรับตั้งค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า





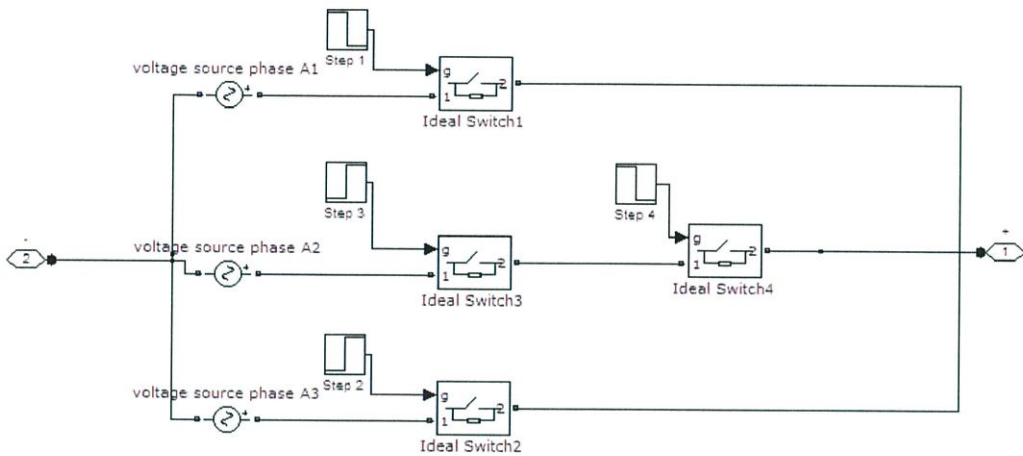
รูปที่ 3.3 การปรับตั้งค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

- การปรับตั้งค่าใน Bus Selector



รูปที่ 3.4 การปรับตั้งค่าใน Bus Selector

### 3.1.2 วงจรภายใน Subsystem



รูปที่ 3.5 วงจรภายใน Subsystem

หลักการการทำงานของวงจรภายใน Subsystem

Ideal Switch1 ทำการเปิดวงจรที่เวลา 0.445 วินาที

Ideal Switch2 ทำการปิดวงจรที่เวลา 0.555 วินาที

Ideal Switch3 ทำการปิดวงจรที่เวลา 0.445 วินาที

Ideal Switch4 ทำการเปิดวงจรที่เวลา 0.555 วินาที

### 3.1.3 ค่าที่ใช้ในการจำลองในกรณีต่าง ๆ

ในการทดสอบในหัวข้อ การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ในการจำลองปัญหาในกรณีต่าง ๆ โดยใช้มอเตอร์พิกัด 5.4 HP (4KW) 400V 50 Hz 1430 RPM โดยจะมีการจำลองปัญหาในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

ตารางที่ 3.1 ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

สภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส (V)		
	$V_a$	$V_b$	$V_c$
แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5%	203.9	220	220
แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5%	204.3	204.3	220
แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5%	209	209	209

หมายเหตุ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟสในการทดสอบให้เกิดขึ้นกับเฟส A ส่วนสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟสให้เกิดขึ้นกับเฟส A และ B

- สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

**ตารางที่ 3.2** ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

สภาวะความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส (V)		
	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5%	236.9	220	220
แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5%	237.4	237.4	220
แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5%	231	231	231

หมายเหตุ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟสในการทดสอบให้เกิดขึ้นกับเฟส A ส่วนสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟสให้เกิดขึ้นกับเฟส A และ B

- สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

**ตารางที่ 3.3** ค่าของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าในสภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

สภาวะการจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส	แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส (V)		
	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>
จ่ายไฟฟ้า 2 เฟส	0	220	220

หมายเหตุ สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส ในการจ่ายไฟฟ้า 2 เฟสจะจ่ายไฟฟ้าเฟส A และ B

- สภาวะความถี่ผิดปกติ

**ตารางที่ 3.4** ค่าความถี่ในสภาวะความถี่ผิดปกติ

สภาวะความถี่ผิดปกติ	ความถี่ (Hz)
ความถี่ต่ำกว่าปกติ 1%	49.5
ความถี่สูงกว่าปกติ 1%	50.5

- สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์

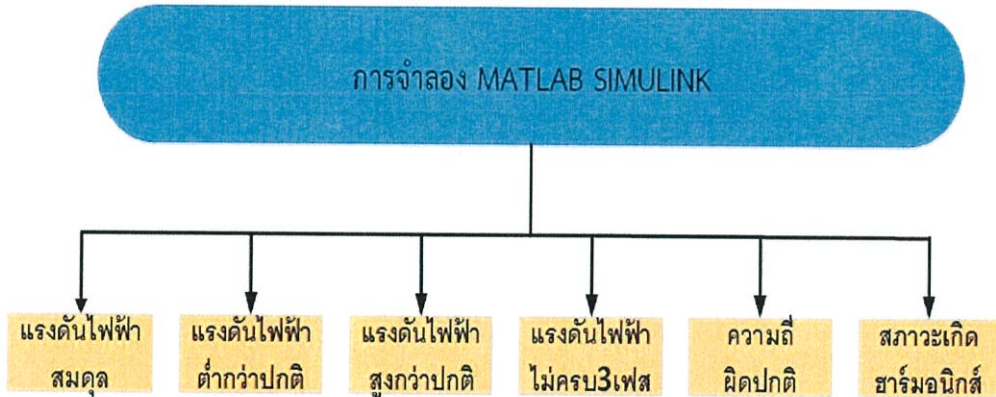
กรณีที่มีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic Ballast ) หรืออุปกรณ์ที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง ( SWITCHING MODE POWER SUPPLY : SMPS ) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ ( Computer )

ตารางที่ 3.5 ค่าของแอมพลิจูดฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ (p.u.) และเฟสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ( $\theta$ ) ในสภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์

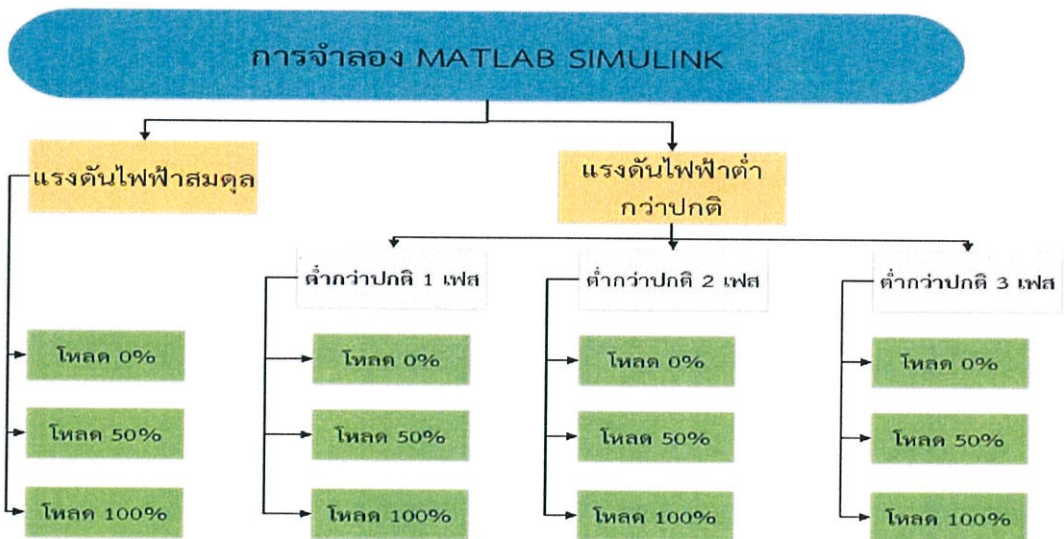
สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์	แอมพลิจูดฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ (p.u.)		เฟสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ ( $\theta$ )	
	อันดับ 3	อันดับ 5	อันดับ 3	อันดับ 5
เกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์	0.199	0.074	-144	62
เกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก	0.199	0.074	-144	62
เกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ	0.199	0.074	-144	62

หมายเหตุ เฟสฮาร์มอนิกส์อันดับที่1 ( $\theta$ ) คือ -124

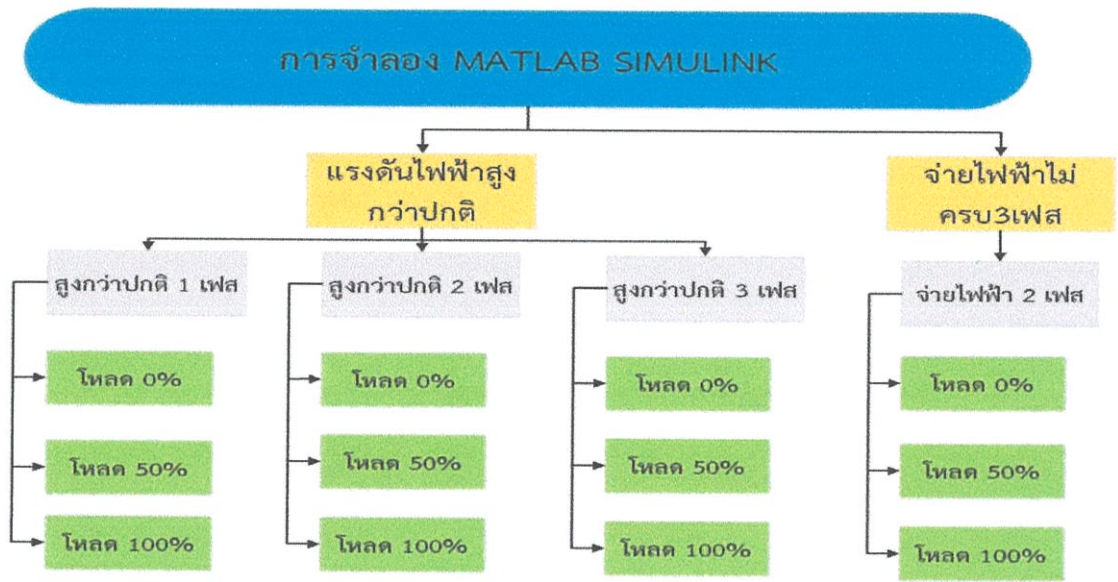
### 3.1.4 แผนภาพแสดงการจำลองโปรแกรม MATLAB SIMULINK



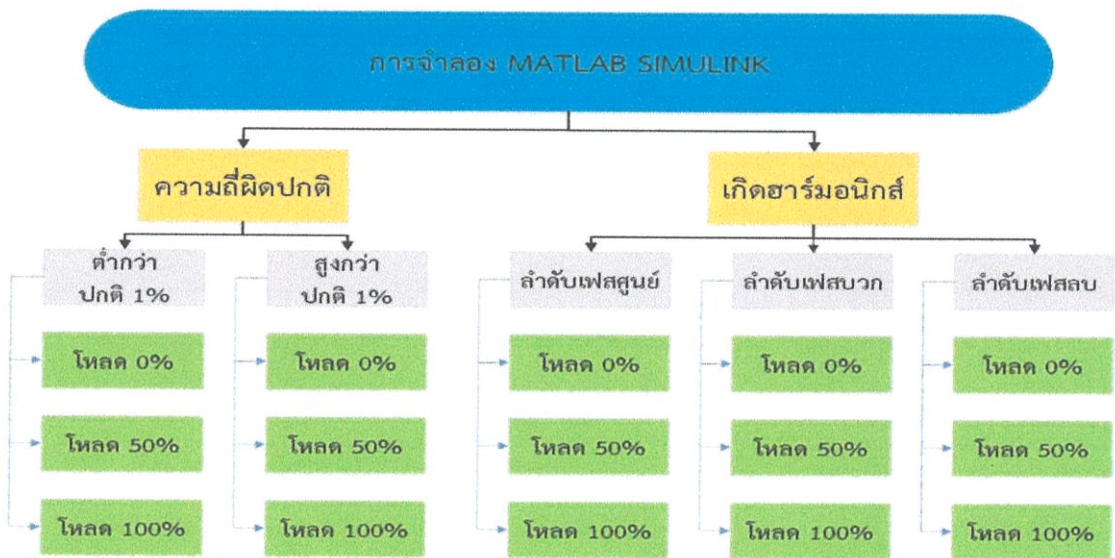
รูปที่ 3.6 แผนภาพการจำลองโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยรวม



รูปที่ 3.7 แผนภาพการจำลองสภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล และแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ

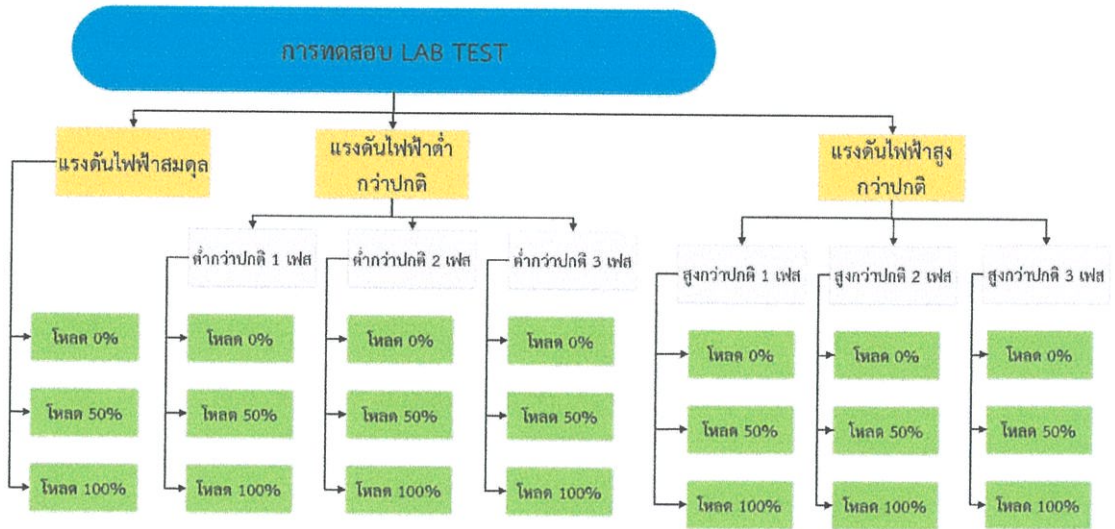


รูปที่ 3.8 แผนภาพการจำลองสถานะแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ และจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ3เฟส



รูปที่ 3.9 แผนภาพการจำลองสถานะความถี่ผิดปกติ และสถานะเกิดฮาร์มอนิกส์

## 3.1.5 แผนภาพแสดงการทดสอบ ( LAB TEST )

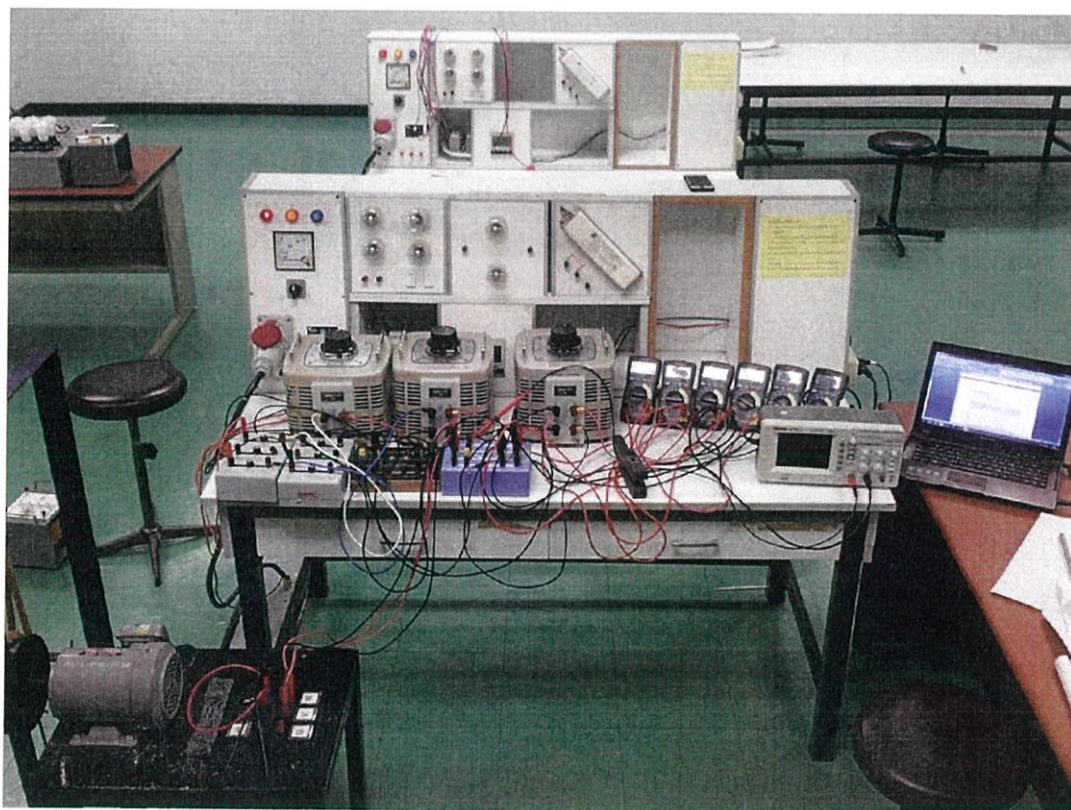


รูปที่ 3.10 แผนภาพการทดสอบ ( LAB TEST )

### 3.2 การทดสอบและวิธีการทดสอบ ( LAB TEST )

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- |  |           |
|--|-----------|
| 1) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า                                    | 1 ตัว     |
| 2) แท่นทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส   | 1 ชุด     |
| 3) multi-meter   | 6 เครื่อง |
| 4) Single phase variable transformer (Variac) จ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด 5 แอมป์ | 3 ตัว     |
| 5) Digital Oscilloscope  | 1 เครื่อง |
| 6) Probe คูณ 100 และ Current probe   | 1 ชุด     |
| 7) Junction Box  | 3 ตัว     |
| 8) Fuse  | 3 ตัว     |
| 9) ทาโคมิเตอร์ (Tachometer)  | 1 เครื่อง |
| 10) ตาซังปริงแบบแขวนพร้อมเชือก และตะขอเกี่ยวค้ำน้ำหนัก                     | 1 เครื่อง |
| 12) ตุ่มเหล็กขนาดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม  | 6 ชุด     |
| 13) สายไฟ  | 60 เส้น   |



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

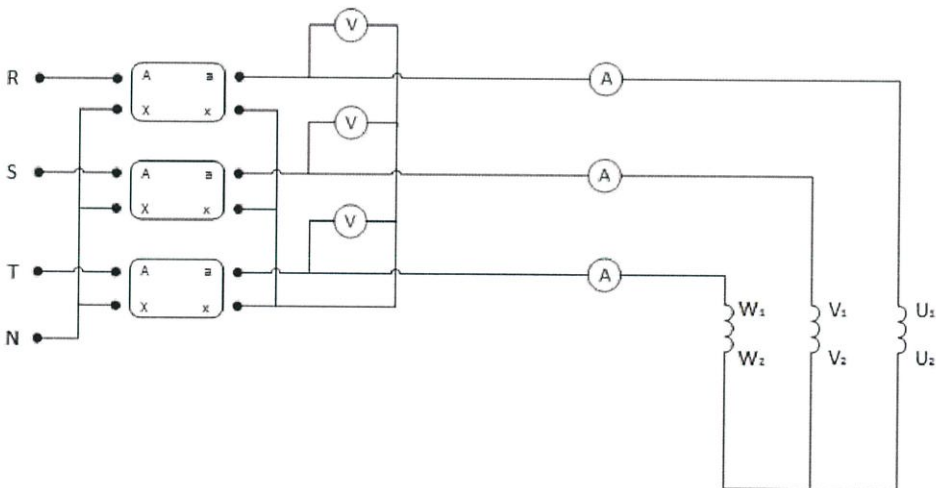
### 3.2.1 การทดสอบในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุลขณะไม่มีโหลดและขณะขับโหลด

รูปแบบการทดสอบตามเหตุการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบ่งออกเป็น

- 1) แรงดันไฟฟ้าสมดุลสามเฟส
  - 2) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส(1 $\Phi$ -Under Voltage Unbalance)5%
  - 3) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส(2 $\Phi$ -Under Voltage Unbalance)5%
  - 4) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเกินกว่าปกติ 1 เฟส(1 $\Phi$ -Over Voltage Unbalance)5%
  - 5) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเกินกว่าปกติ 2 เฟส(2 $\Phi$ -Over Voltage Unbalance)5%
- ในแต่ละกรณีจะขับโหลดแบบ No Load ( 0% ) , Half Load ( 50% ) และ Full Load (100%)

### 3.2.2 วิธีทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ตามรูปแบบที่กำหนดไว้โดยใช้ Variac 1 เฟส และต่อมอเตอร์แบบ Star isolated neutral ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าแต่ละเฟส โดยปรับ Variac 1 เฟส 3 ตัว พร้อม ๆ กัน ไปที่แรงดัน 220 V ทำการบันทึกค่า คือ แรงดัน ( V ) , กระแส ( I ) , ความเร็วรอบ (rpm) และทำการปรับแรงดันไฟฟ้าไปที่สภาวะไม่สมดุลตามกรณีที่ได้ตั้งไว้ทั้ง 6 กรณี และใส่โหลดที่ Load ( 0% ) , Half Load ( 50% ) , Full Load ( 100% ) และบันทึกค่า คือ แรงดัน ( V ) , กระแส ( I ) , ความเร็วรอบ ( rpm ) สำหรับการทดสอบขณะขับโหลดจะติดตั้งชุดขับโหลดเข้ากับเพลลาของโรเตอร์ทำการทดสอบด้วยการใส่ตุ้มน้ำหนักเพื่อเพิ่มโหลดที่ระดับจนครบ 3 ระดับแล้ว บันทึกค่า แรงดัน ( V ) , กระแส ( I ) และความเร็วรอบ ( rpm )



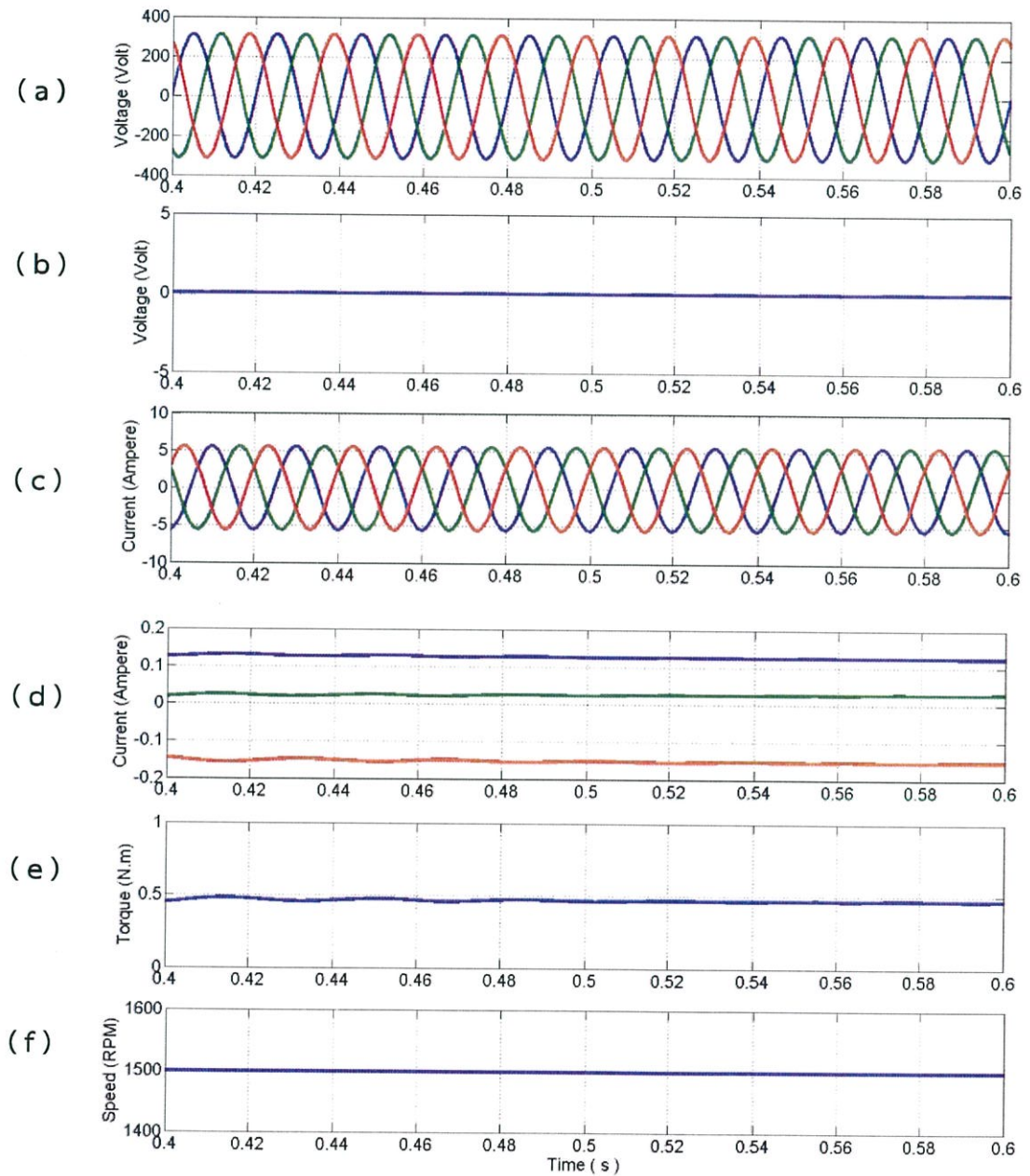
รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ( LAB TEST )

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการจำลองใน MATLAB SIMULINK

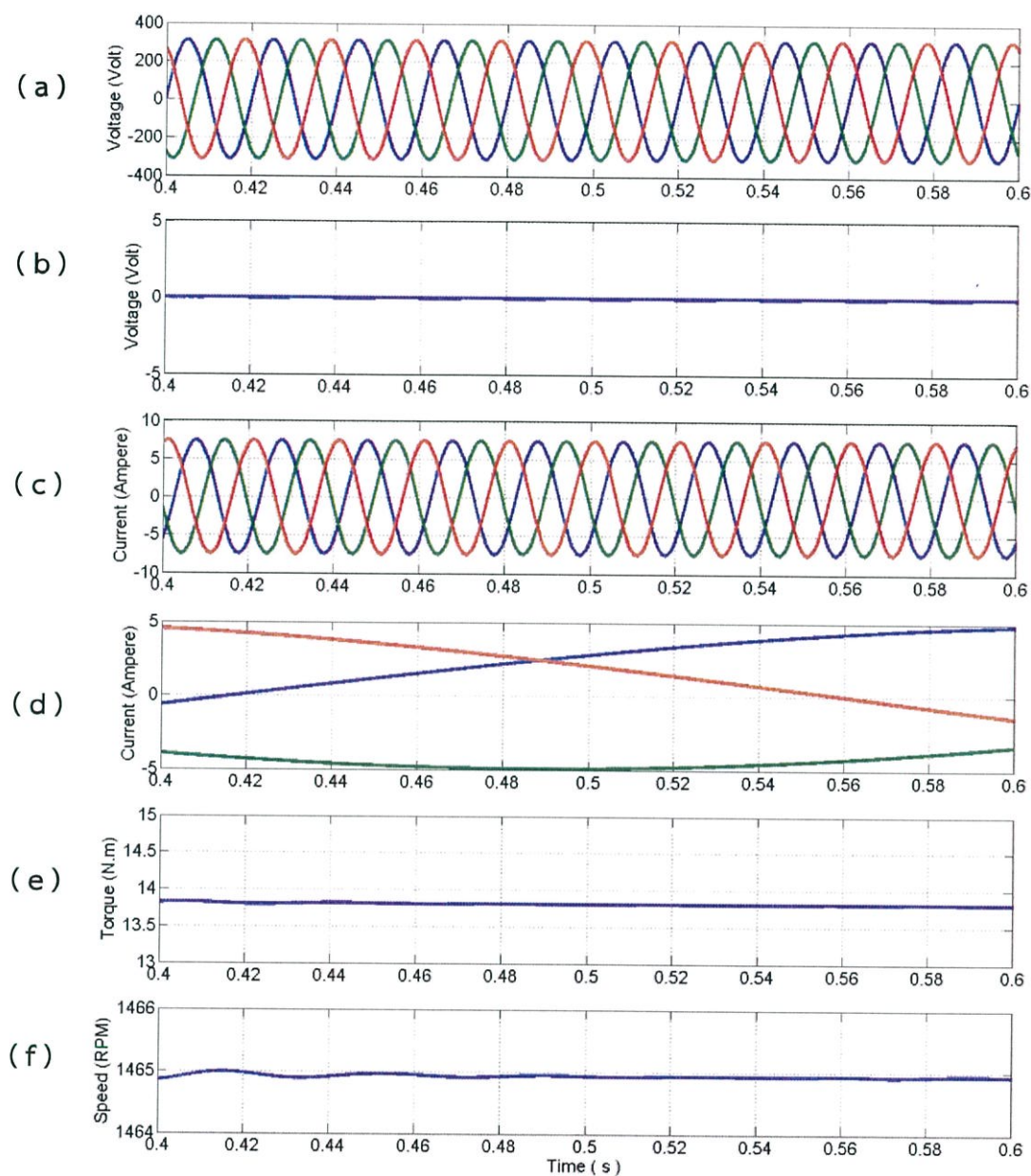
#### 4.1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0%



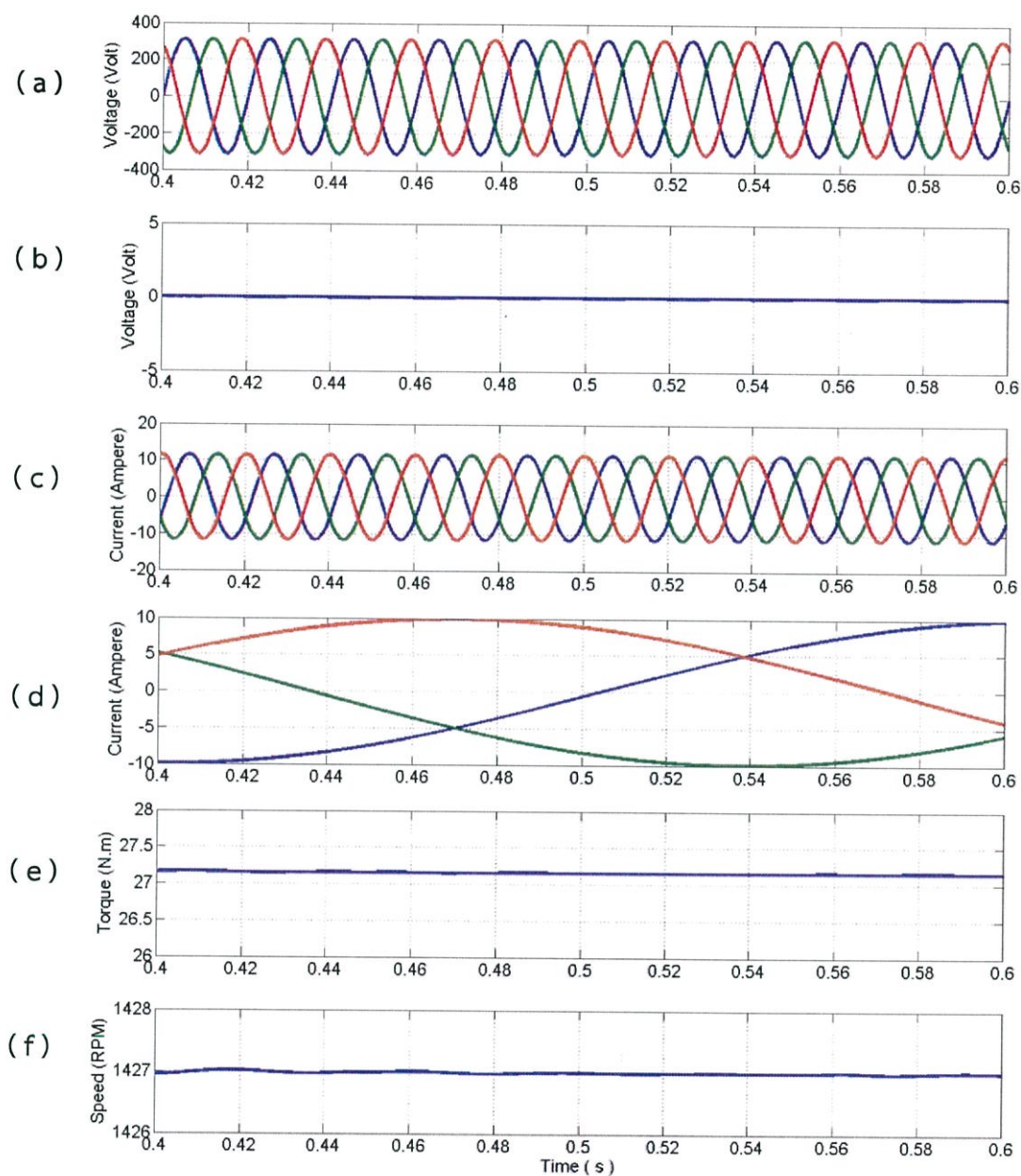
รูปที่ 4.1 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
(c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
(e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.2** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.3** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าในขณะที่โหลด 0% 50% และ 100% กราฟจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 220 * 1.414 = 311.08 \text{ V}$

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลทั้งขนาด และมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{\text{sum}}(t) = V_a(t) + V_b(t) + V_c(t) \quad (4-1)$$

เมื่อขนาดของ  $V_a = V_b = V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 311.08i + 311.08\left(-\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) + 311.08\left(-\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าในขณะที่โหลด 0% 50% และ 100% กราฟจะมีความต่างที่ขนาดกระแสสเตเตอร์ ถ้าโหลดมีค่ามาก ค่ากระแสสเตเตอร์ก็จะสูงขึ้นตาม และมุมระหว่าง  $V$  กับ  $I$  จะมีค่าลดลงตามโหลด ( โหลดมาก มุมมีค่าน้อย ) ทำให้ที่โหลด 100% จะมีค่า power factor มากที่สุด ( ประสิทธิภาพสูง )

จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าในขณะที่โหลด 0% 50% และ 100% กราฟจะมีความต่างที่ขนาดกระแสโรเตอร์ ถ้าโหลดมีค่ามาก ค่ากระแสโรเตอร์ก็จะสูงขึ้นตาม และมีลักษณะเป็นเส้นตรง เนื่องมาจากกราฟอยู่ในช่วง steady state จึงทำให้ค่า slip มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จึงทำให้  $f_r$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-3 )

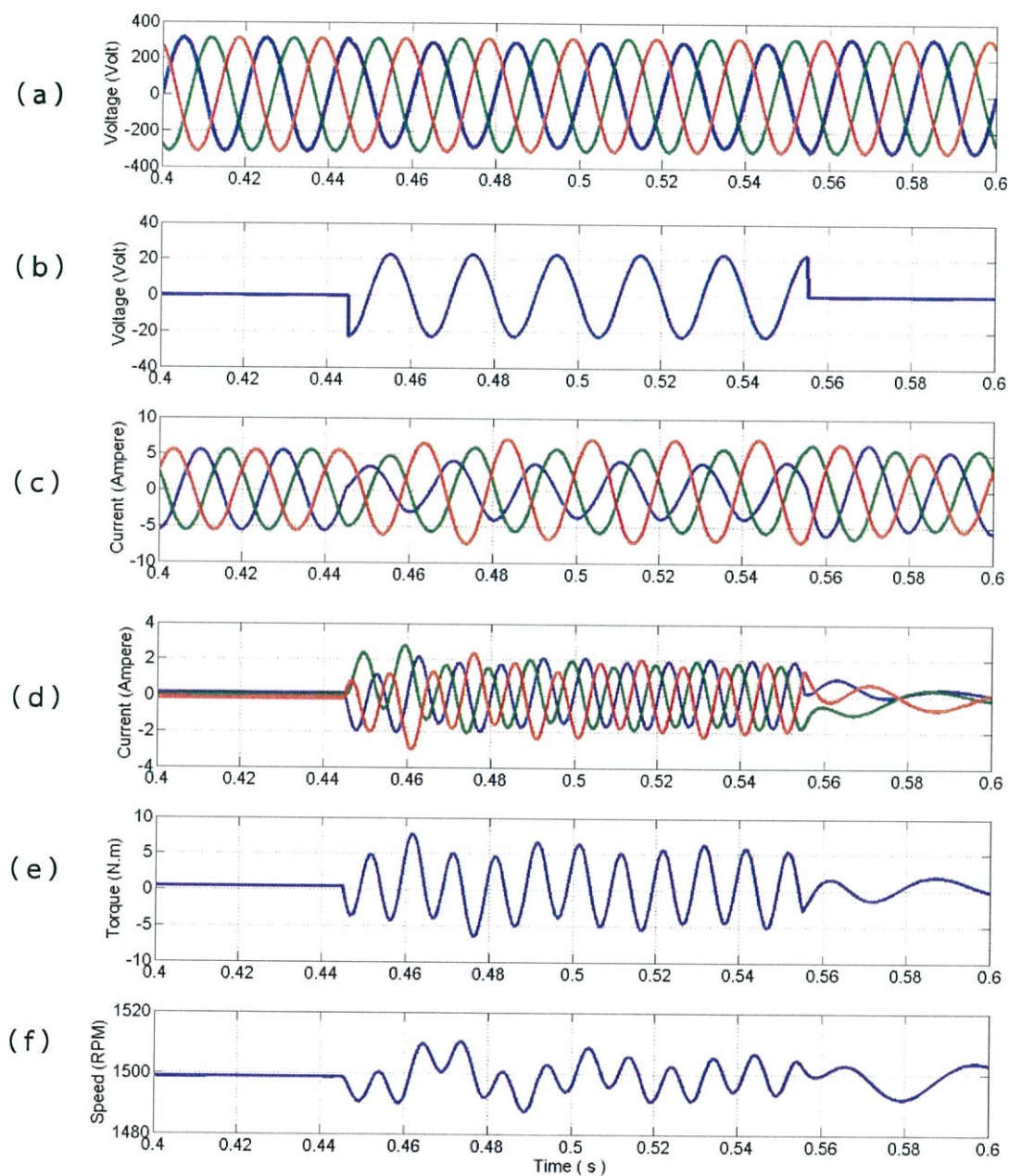
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าโหลดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ในขณะที่โหลด 0% ค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับ 0 Nm ในขณะที่โหลด 50% ค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับ 13.355 Nm ในขณะที่โหลด 100% ค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับ 26.711 Nm

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าในขณะที่โหลด 0% ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ในขณะที่โหลด 50% ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าระหว่างความเร็วซิงโครนัส และค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิกัดของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ ในขณะที่โหลด 100% ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิกัดของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ

#### 4.1.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

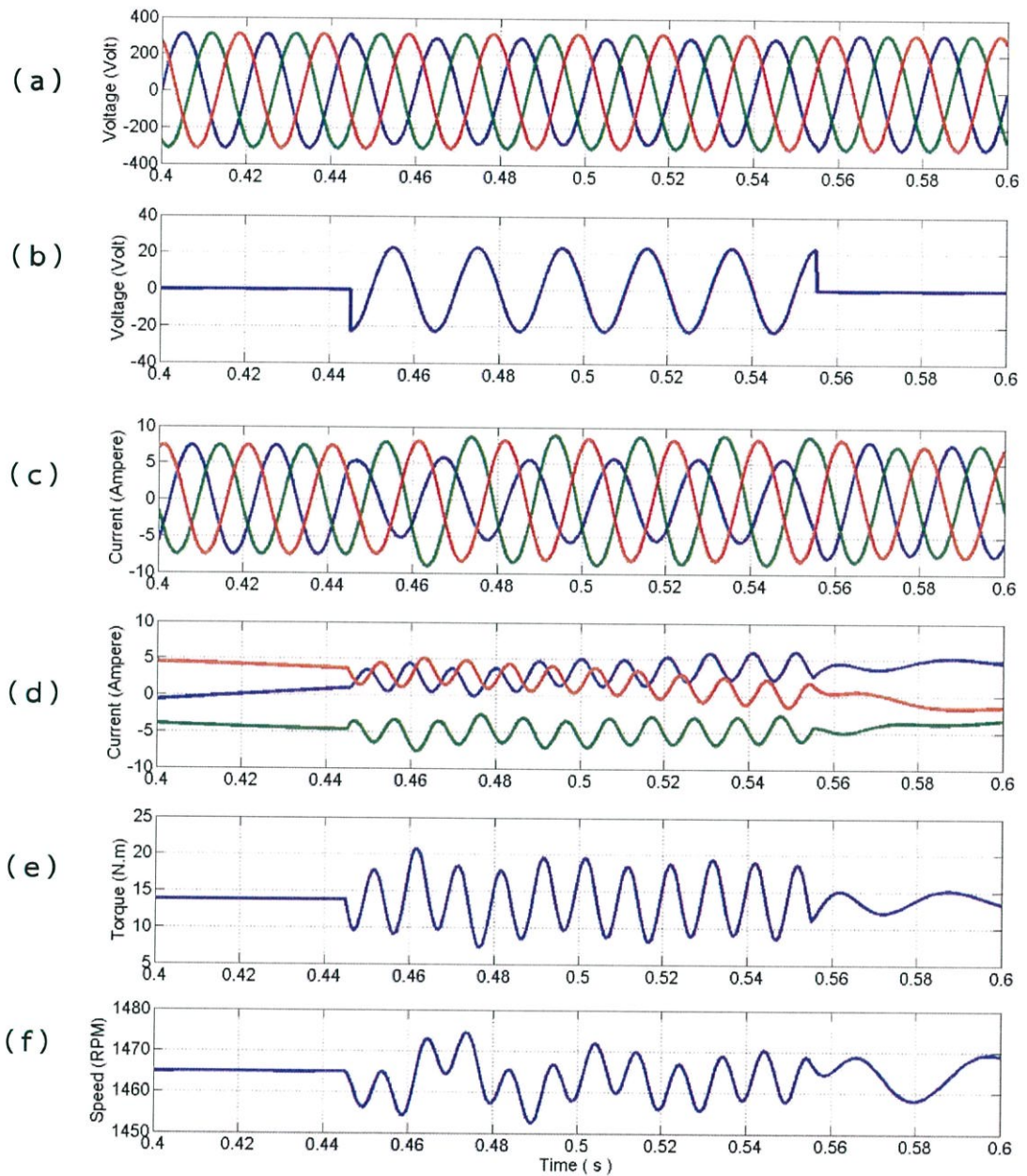
##### 4.1.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%



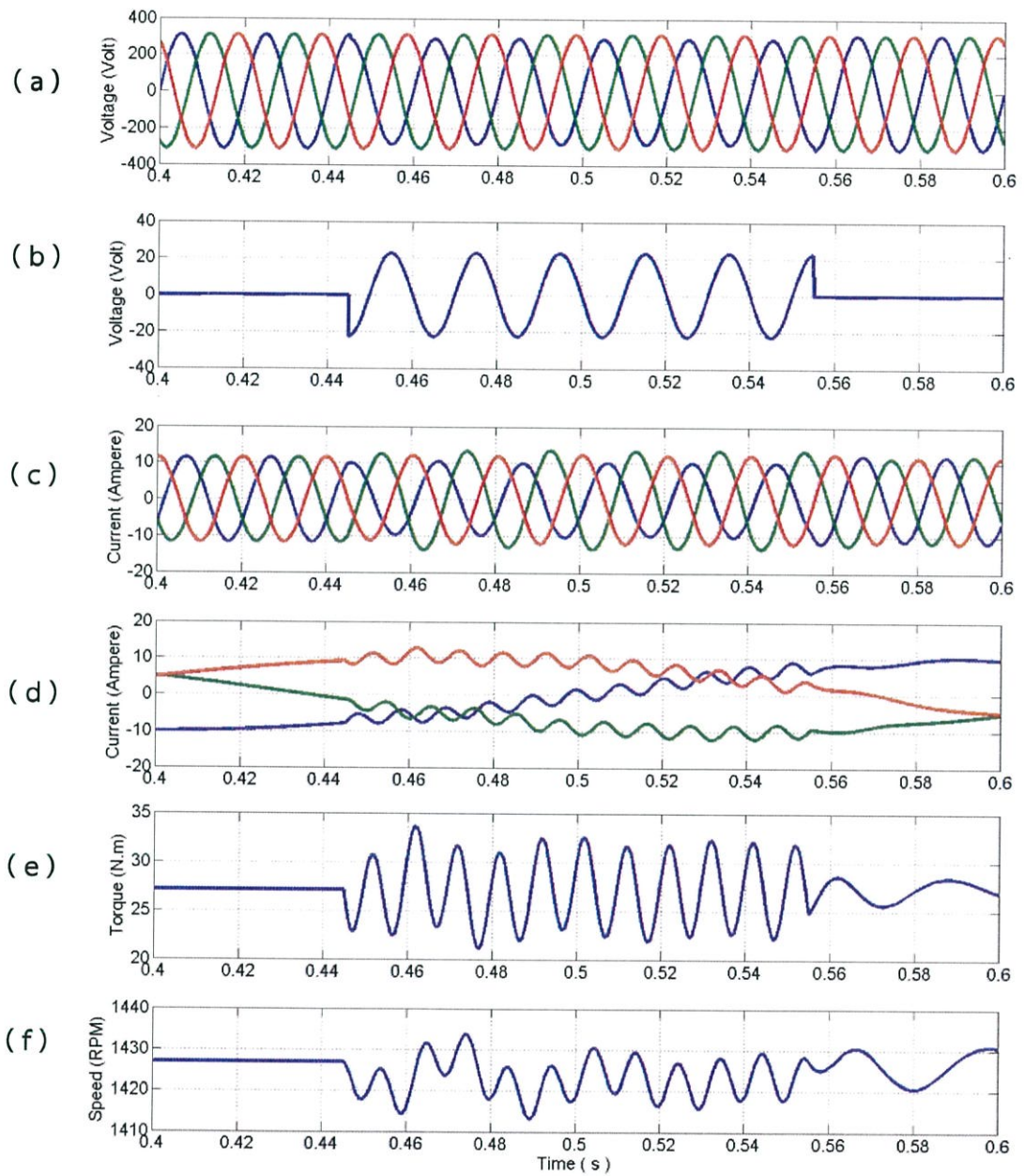
**รูปที่ 4.4** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.5** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.6** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเฟส B , C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  ส่วนเฟส A จะเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 203.9 \times 1.414 = 288.31 \text{ V}$  ซึ่งเฟส A คือ เฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 5%

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสจะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สมดุล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = 288.31 \text{ V}$  ,  $V_b = V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 288.31i + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= -22.77 i \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าเฟส A จะมีขนาดต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ส่วนเฟส B , C จะมีขนาดสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากเฟส B , C ต้องการที่จะรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้า

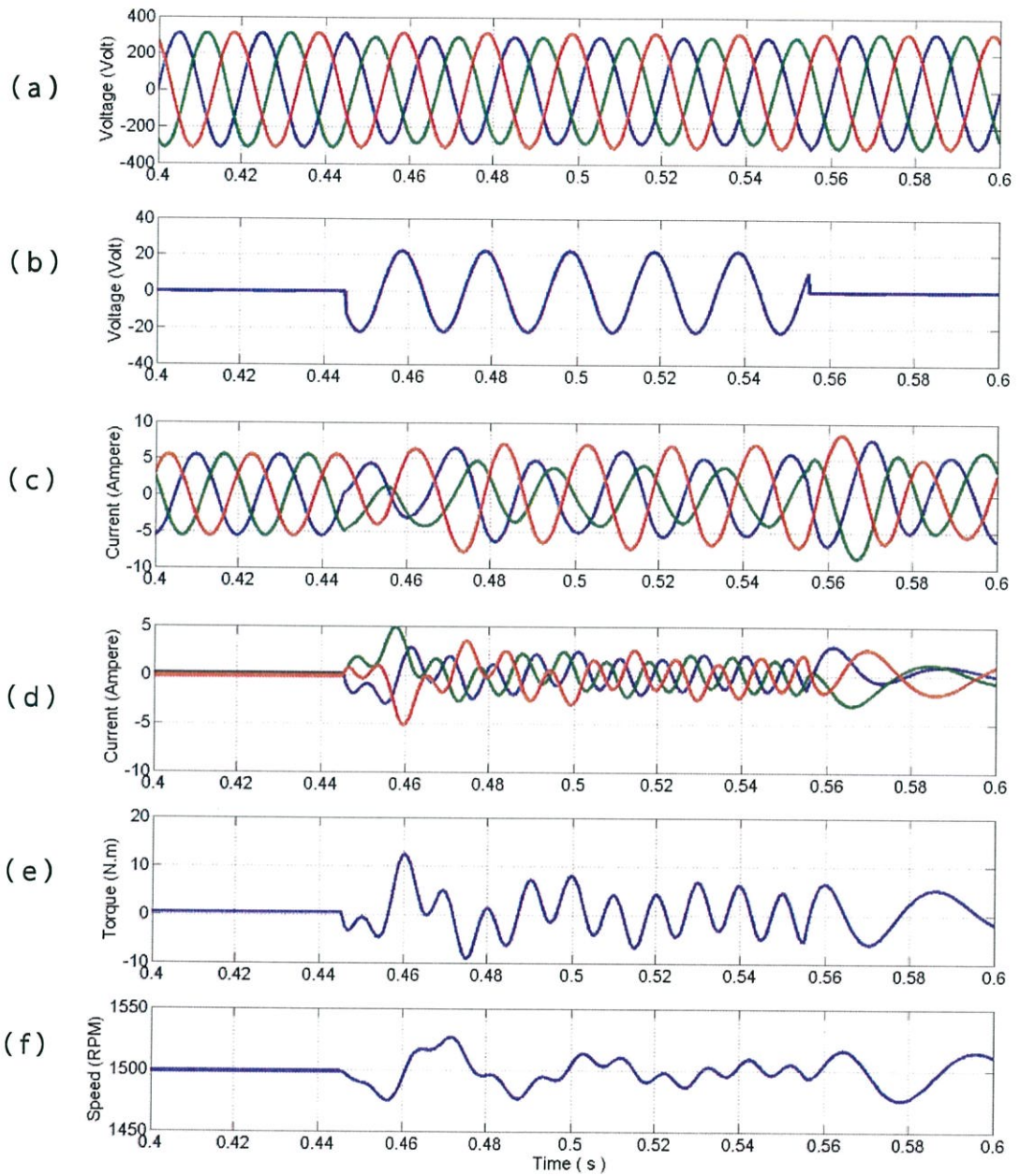
จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสัญญาณกระแสโรเตอร์จะมีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และเกิดการกระเพื่อม

จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าสัญญาณแรงบิดของมอเตอร์จะเกิดการกระเพื่อมและมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ที่เกิดการกระเพื่อม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่จะมีค่าต่ำลงเนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรผกผันกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ ดังสมการที่ ( 2-15 )

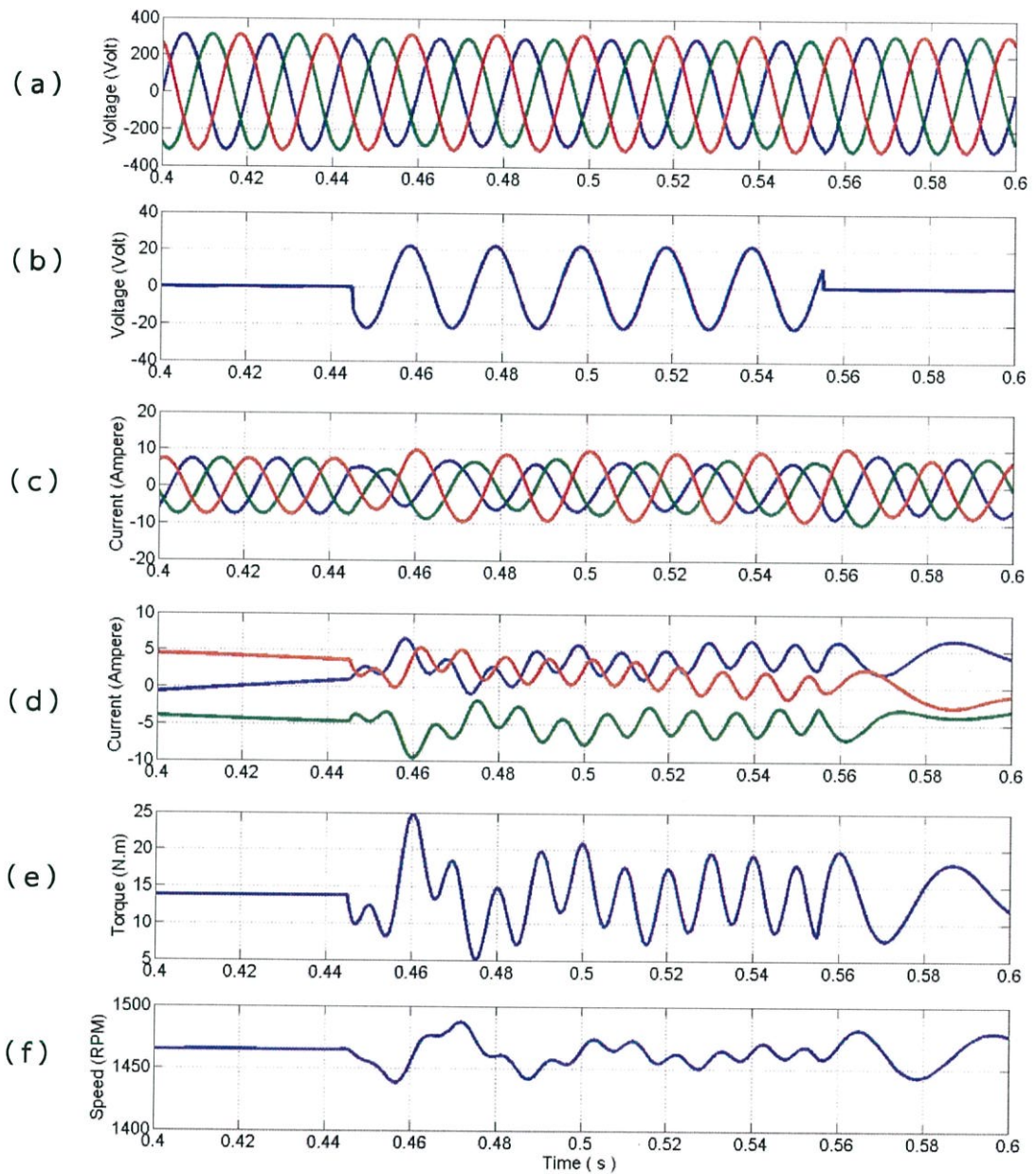
## 4.1.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 0%



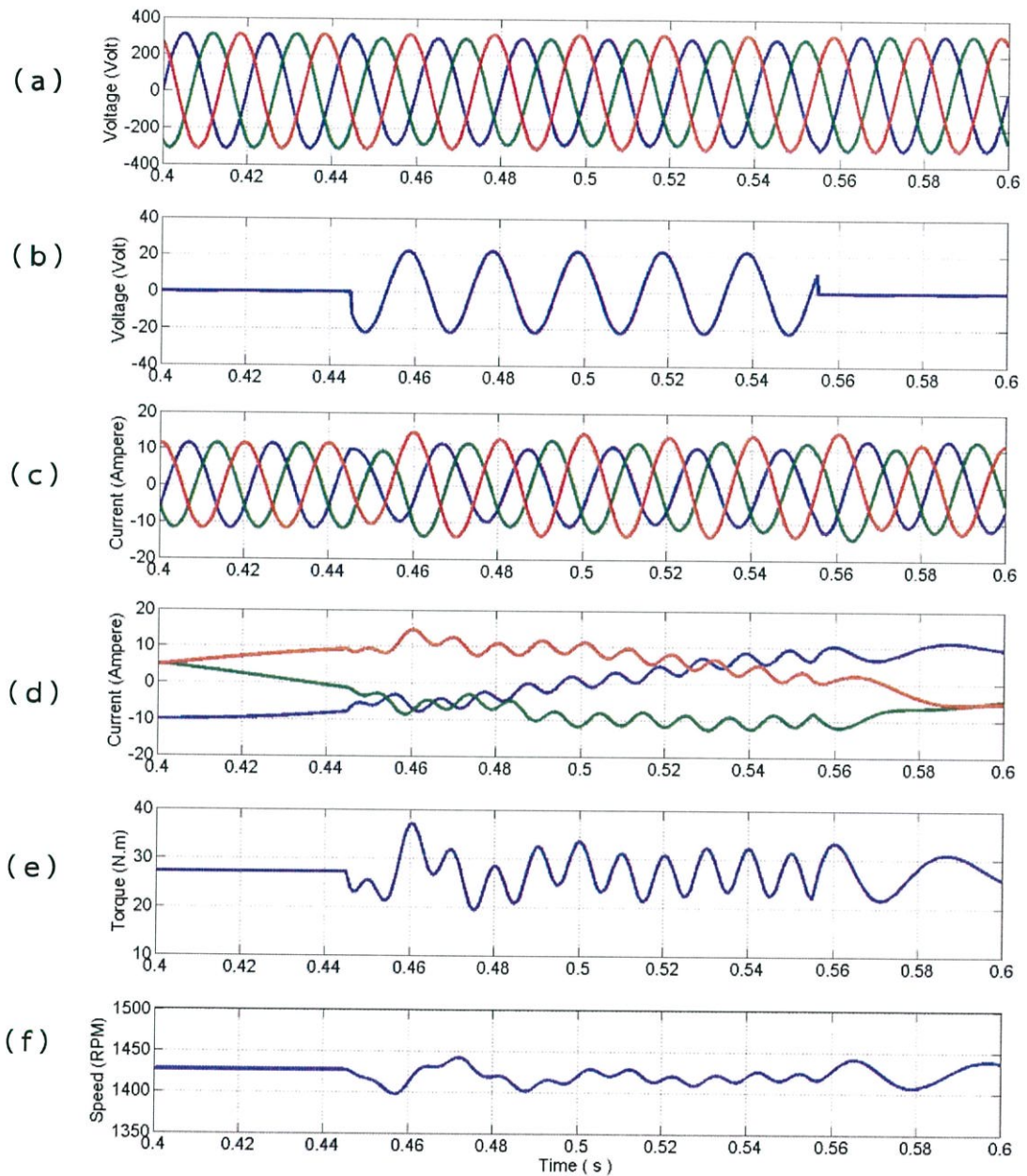
**รูปที่ 4.7** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.8** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.9** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเฟส C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  ส่วนเฟส A , B จะเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 204.3 \times 1.414 = 288.88 \text{ V}$  ซึ่งเฟส A , B คือ เฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ 5%

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่า เป็นสัญญาณที่มีขนาดไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สมดุล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = V_b = 288.88 \text{ V}$  ,  $V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 288.88i + 288.88 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= -299.98i - 19.23j \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสเตเตอร์ในเฟส A , B จะมีขนาดต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ส่วนเฟส C จะมีขนาดสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากเฟส C ต้องการที่จะรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้า

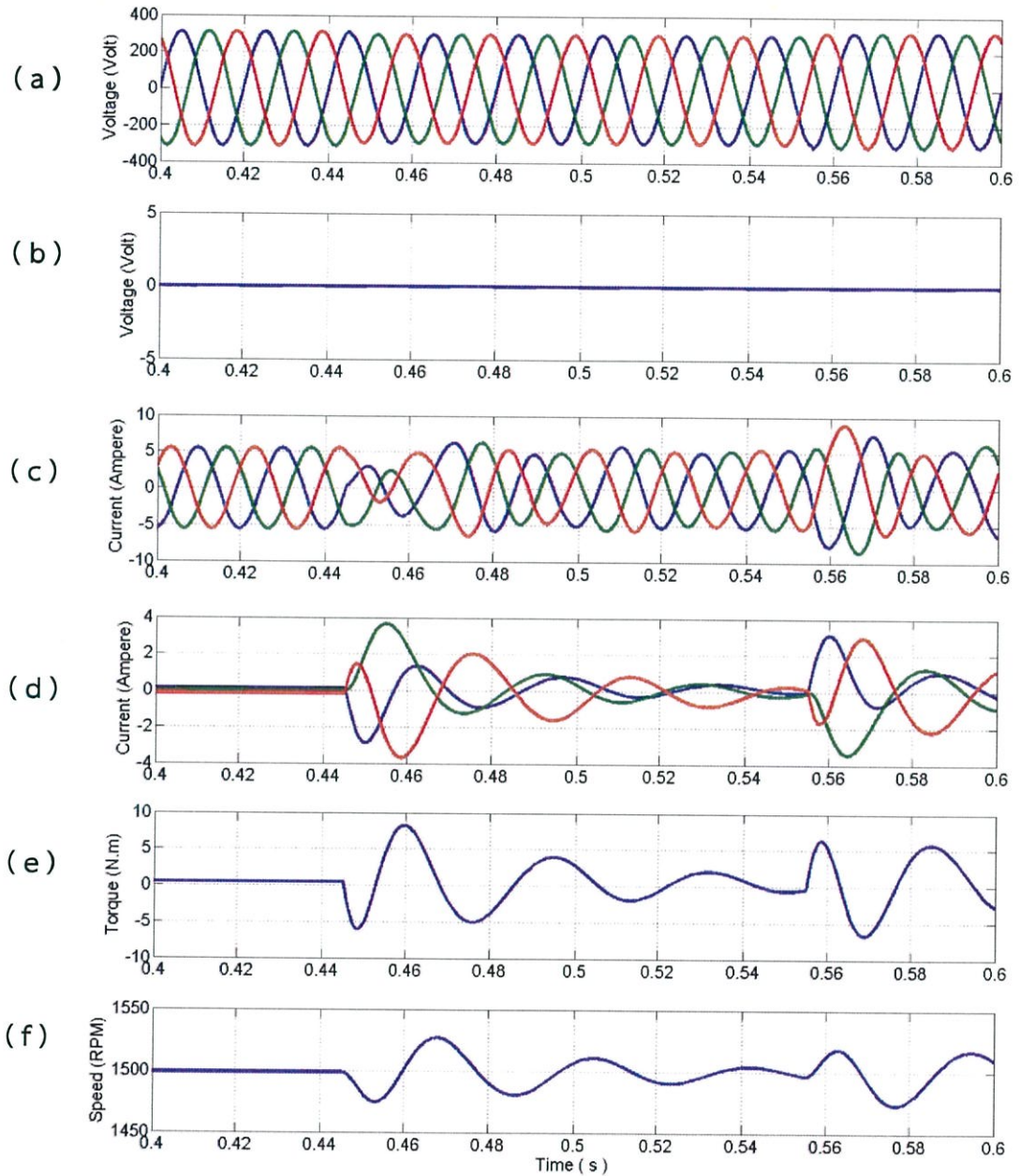
จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสัญญาณกระแสโรเตอร์จะมีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และเกิดการกระเพื่อม ซึ่งในเฟส C เกิดสัญญาณที่ผิดเพี้ยนมากกว่ากรณีที่เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าโหลดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่สัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ที่เกิดการกระเพื่อม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่จะมีค่าต่ำลง เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรผกผันกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ ดังสมการที่ ( 2-15 ) ซึ่งจะเกิดการกระเพื่อมที่น้อยกว่ากรณีที่เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

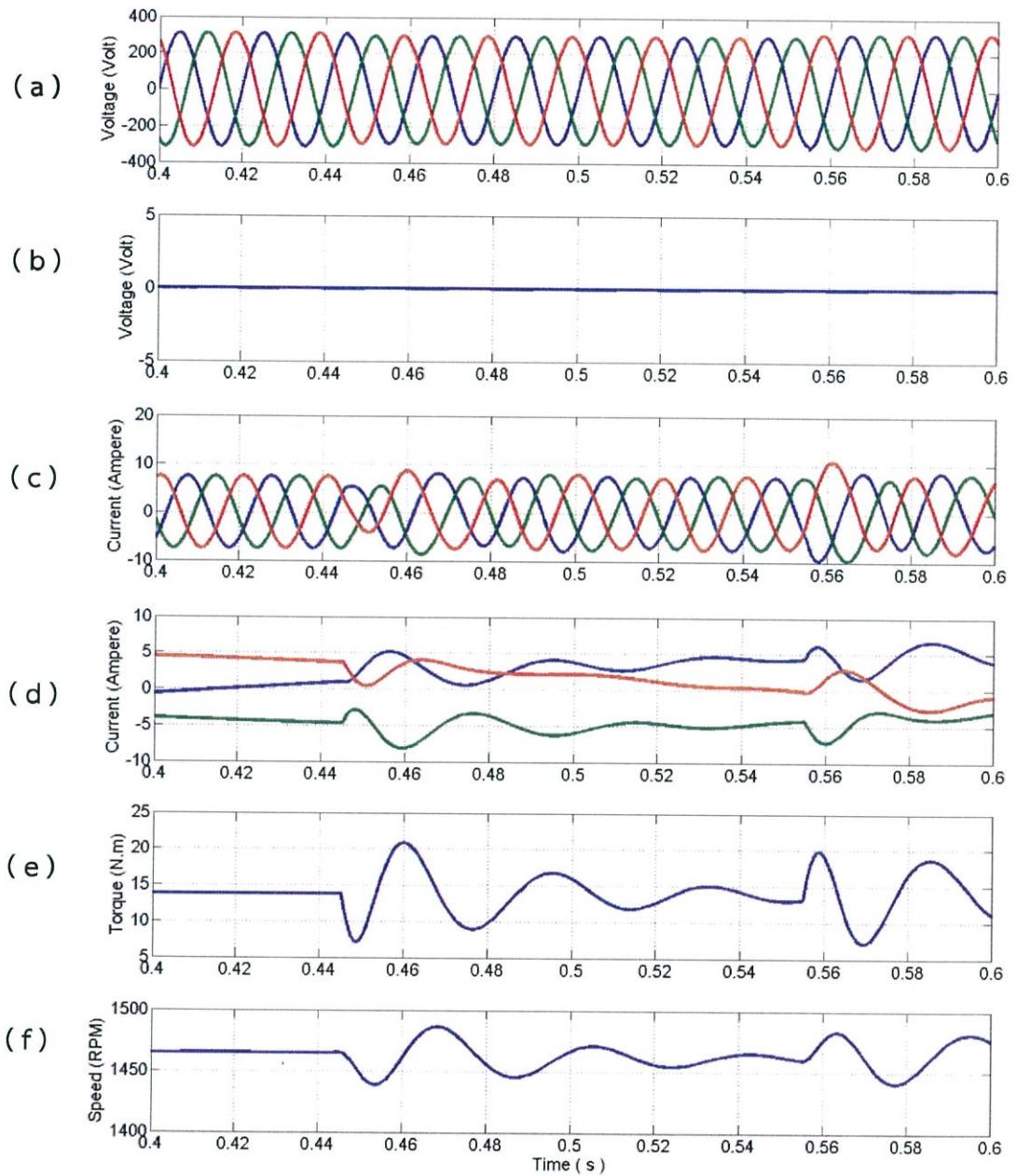
### 4.1.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A, B, C ที่โหลด 0%



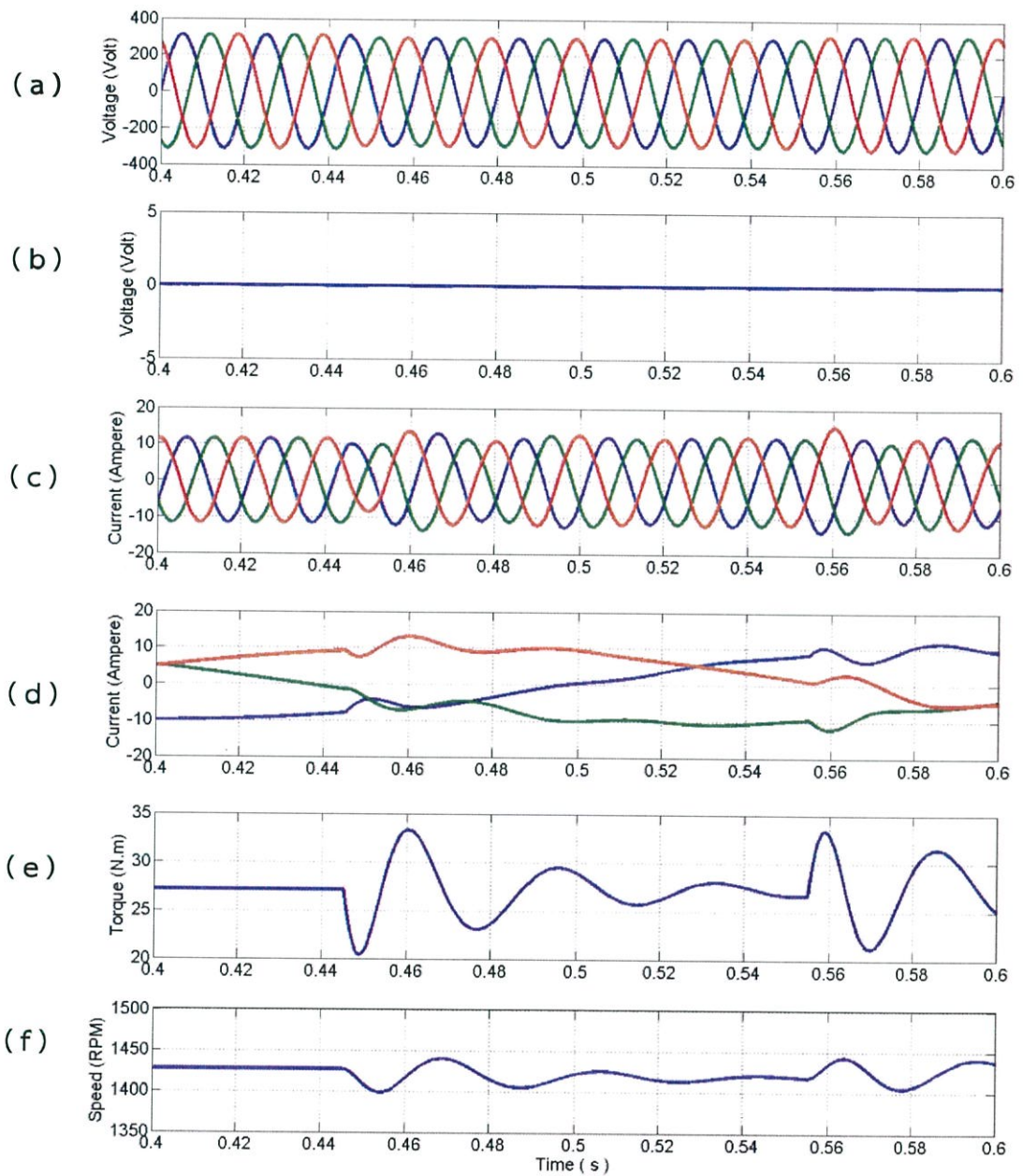
**รูปที่ 4.10** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.11** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส ( c ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A, B, C ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.12** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 209 * 1.414 = 295.53 \text{ V}$

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสจะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเท่ากับศูนย์ตลอดทั้งช่วงเวลา เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลทั้งขนาด และมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = V_b = V_c = 295.53 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 295.53i + 295.53 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 295.53 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากราฟจะมีลักษณะเหมือนกับกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่ต่างกันที่ขนาดกระแสเตเตอร์มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าต่ำกว่าพิกัดมอเตอร์

จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากราฟจะมีลักษณะเหมือนกับกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่ต่างกันที่ขนาดกระแสโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าต่ำกว่าพิกัดมอเตอร์

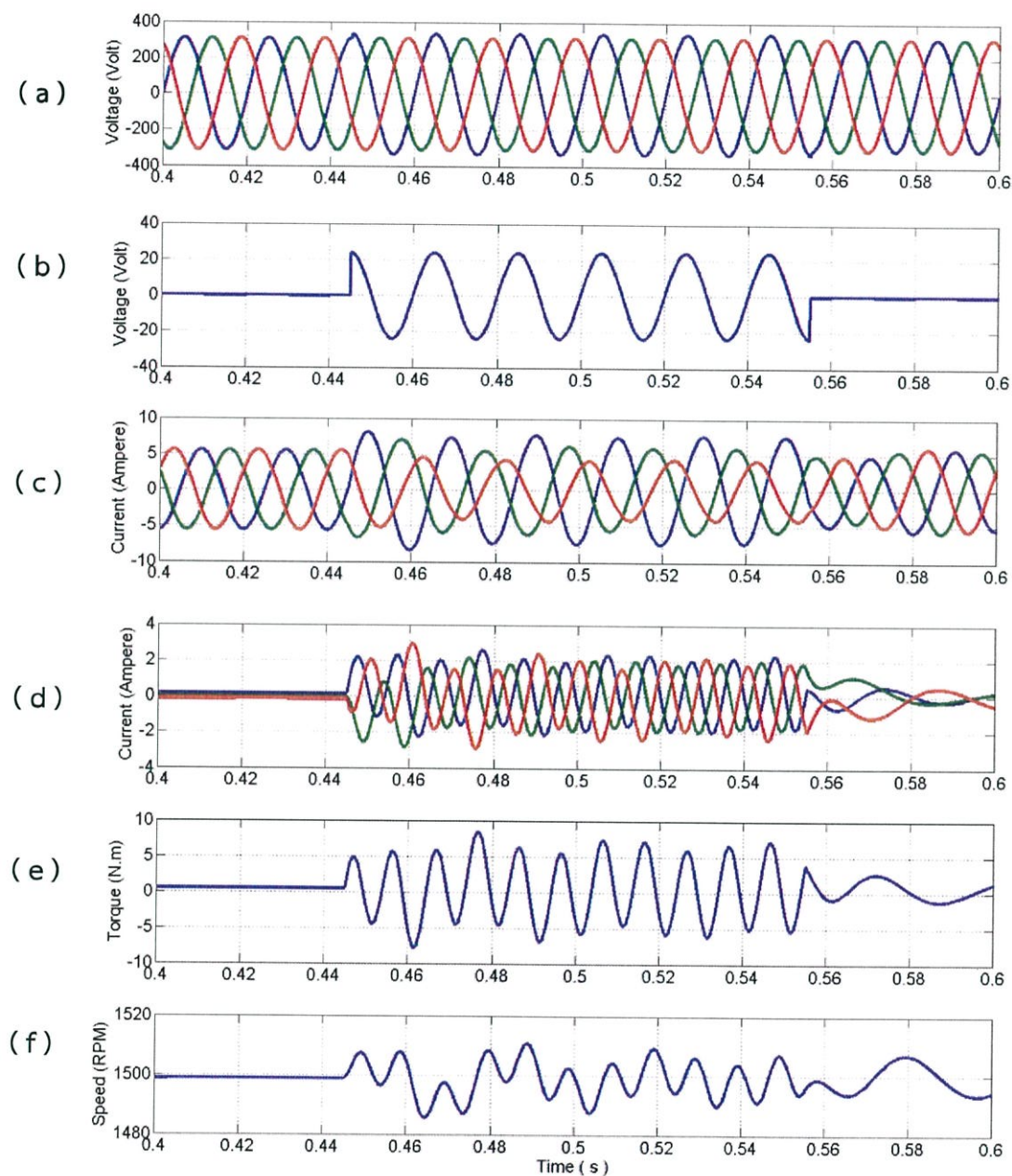
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าโหลดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่จะมีค่าที่สูงกว่าในกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากค่ากระแสโรเตอร์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่จะมีค่าที่น้อยกว่าในกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

### 4.1.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

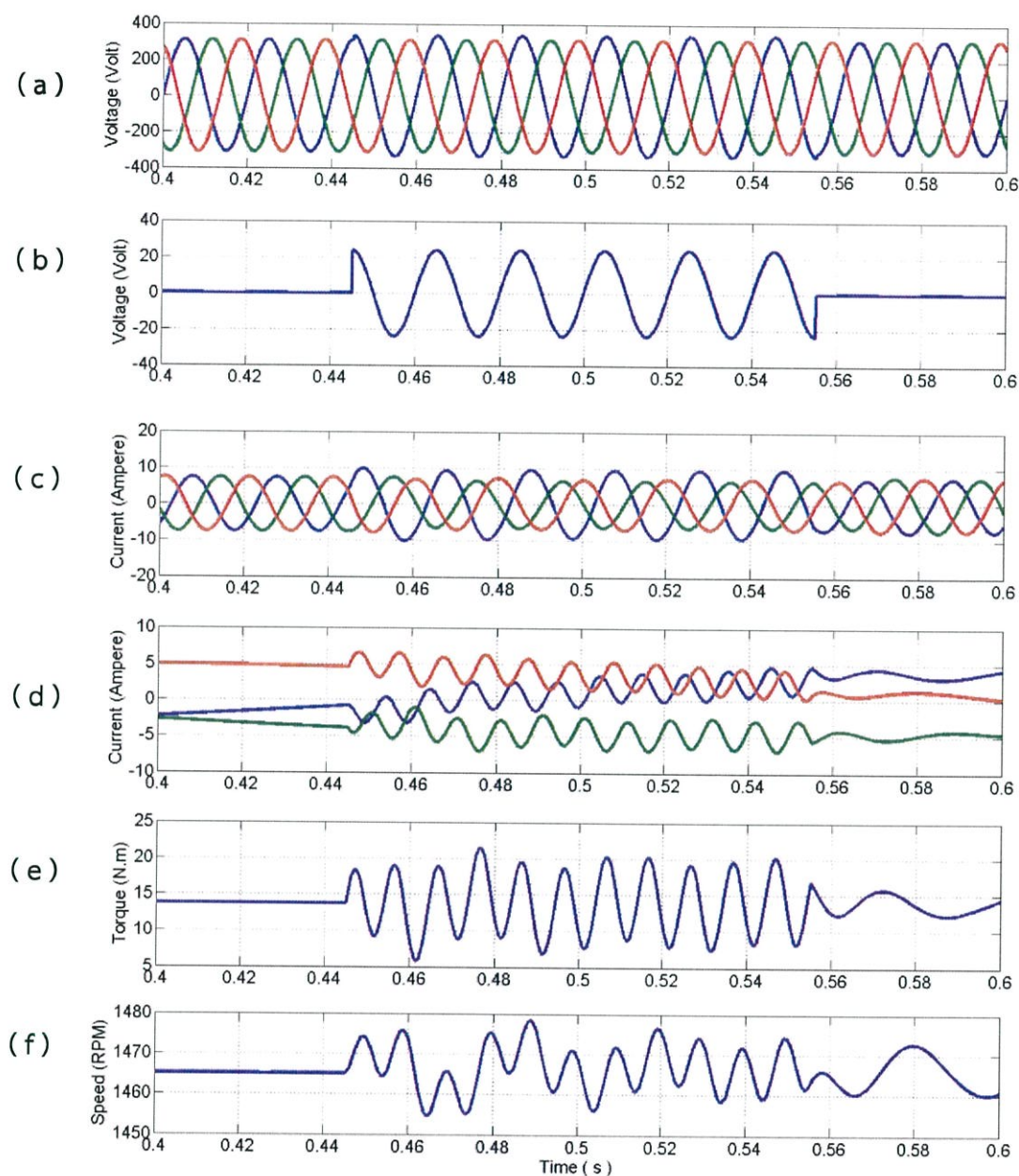
#### 4.1.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%



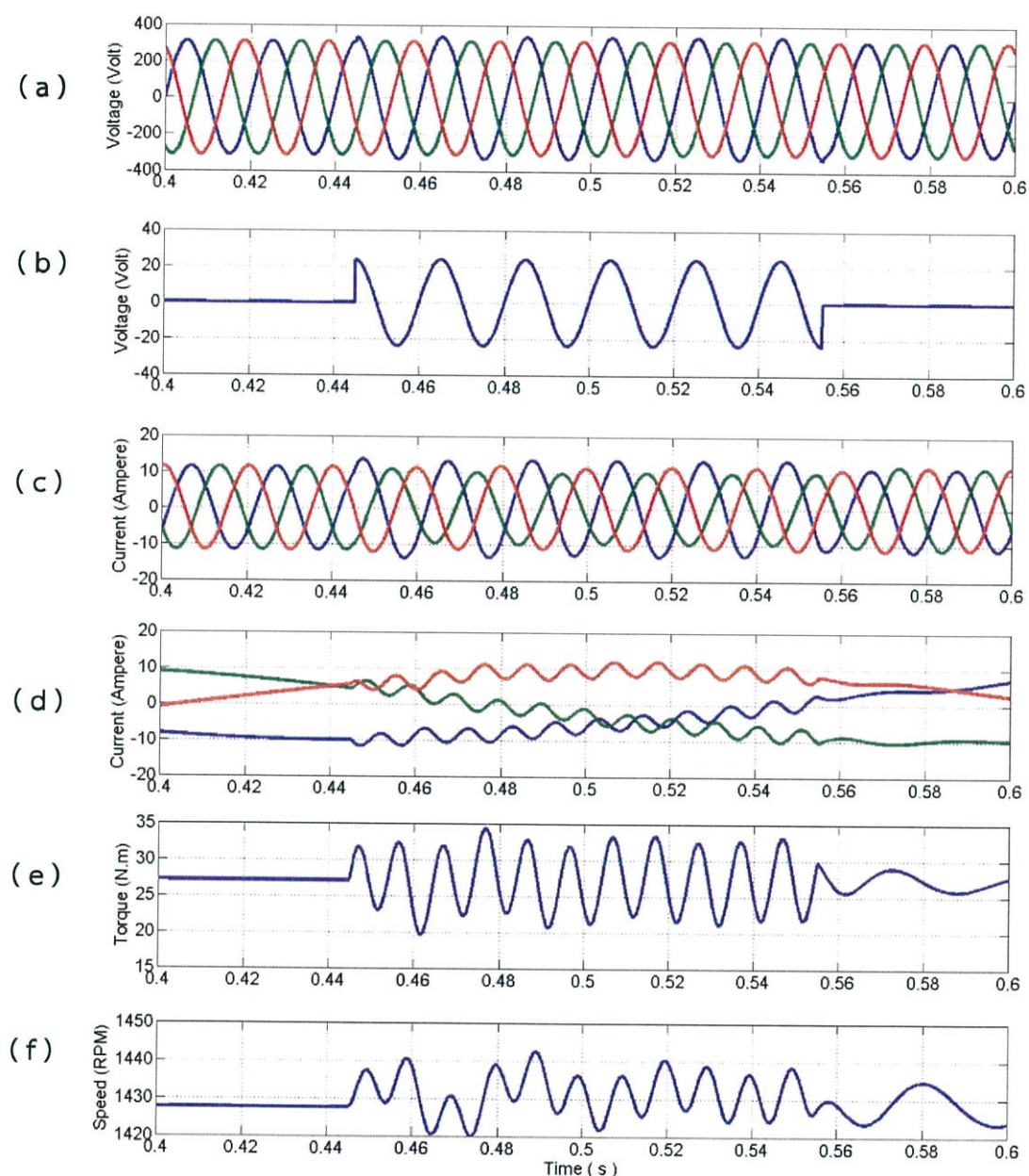
**รูปที่ 4.13** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.14** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.15** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเฟส B , C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V ( \text{peak} ) = 311.08 \text{ V}$  ส่วนเฟส A จะเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V ( \text{peak} ) = 236.9 * 1.414 = 334.98 \text{ V}$  ซึ่งเฟส A คือ เฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 5%

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่า เป็นสัญญาณที่มีขนาดไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สมดุล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = 334.98 \text{ V} , V_b = V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}} ( t ) &= 334.98i + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= 23.9 i \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าในเฟส A , B จะมีขนาดสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ส่วนเฟส C จะมีขนาดต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากเฟส C จะรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้า

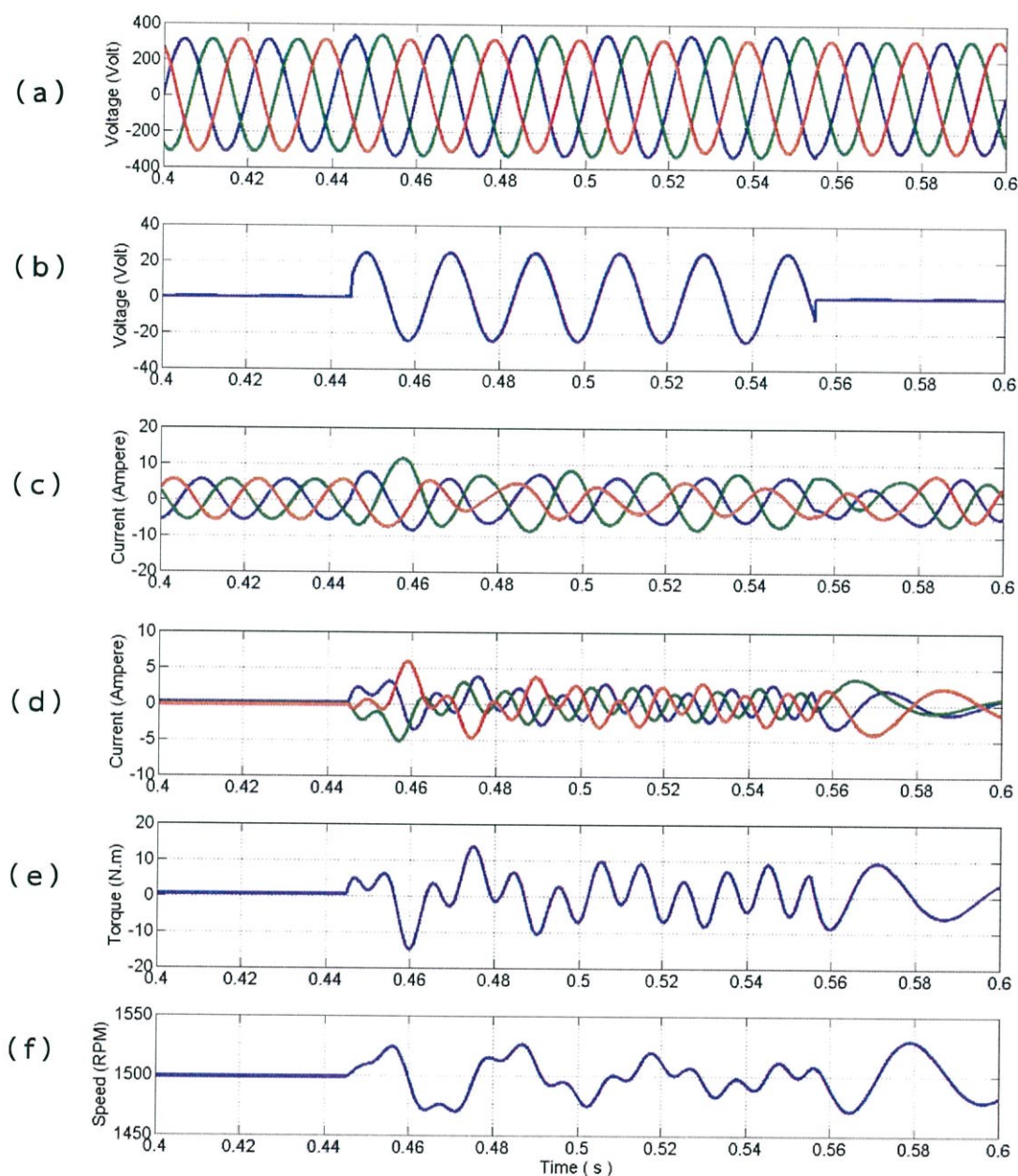
จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสัญญาณกระแสโรเตอร์จะมีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และเกิดการกระเพื่อม

จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าพิกัดมอเตอร์

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์มีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

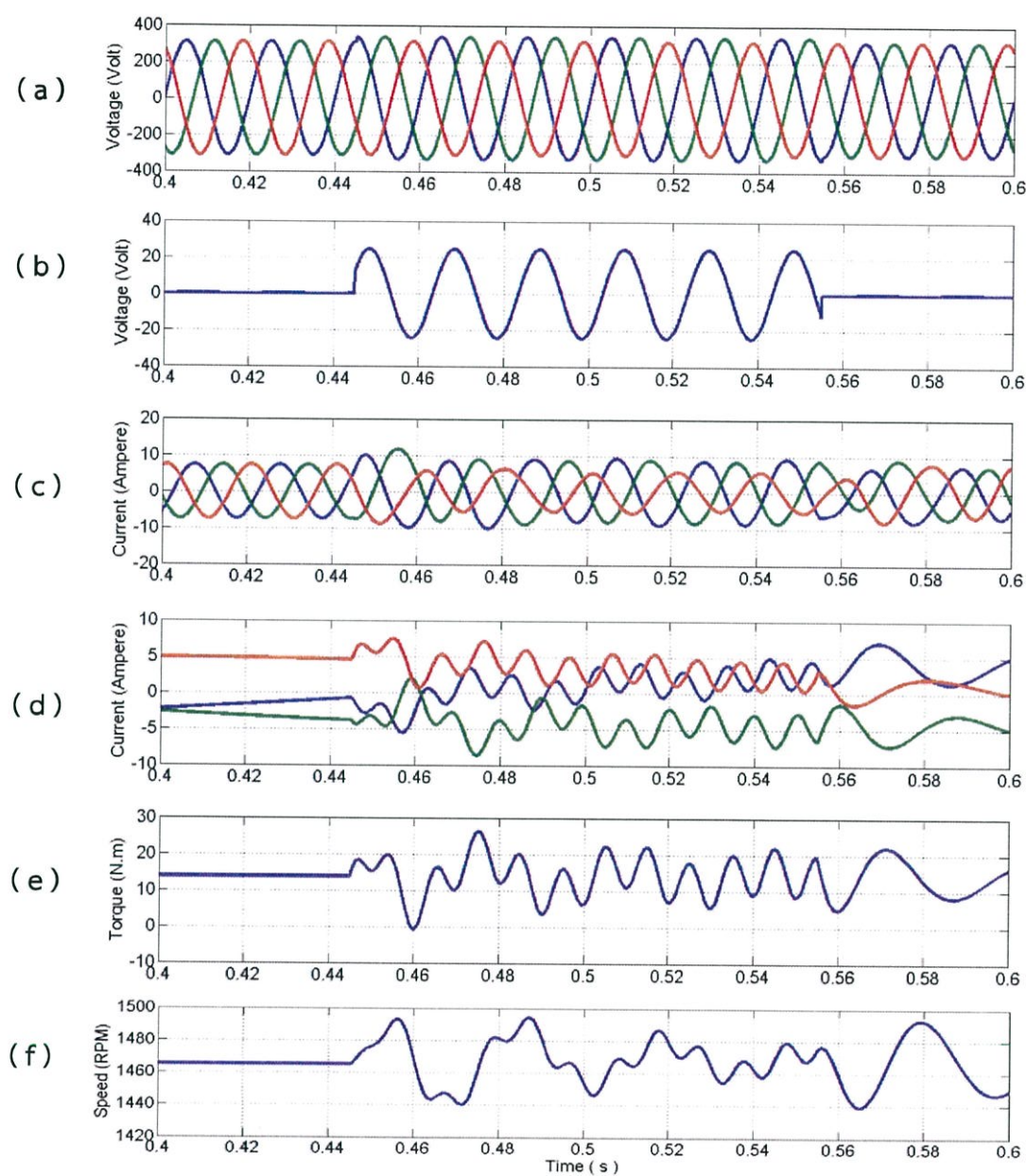
## 4.1.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 0%



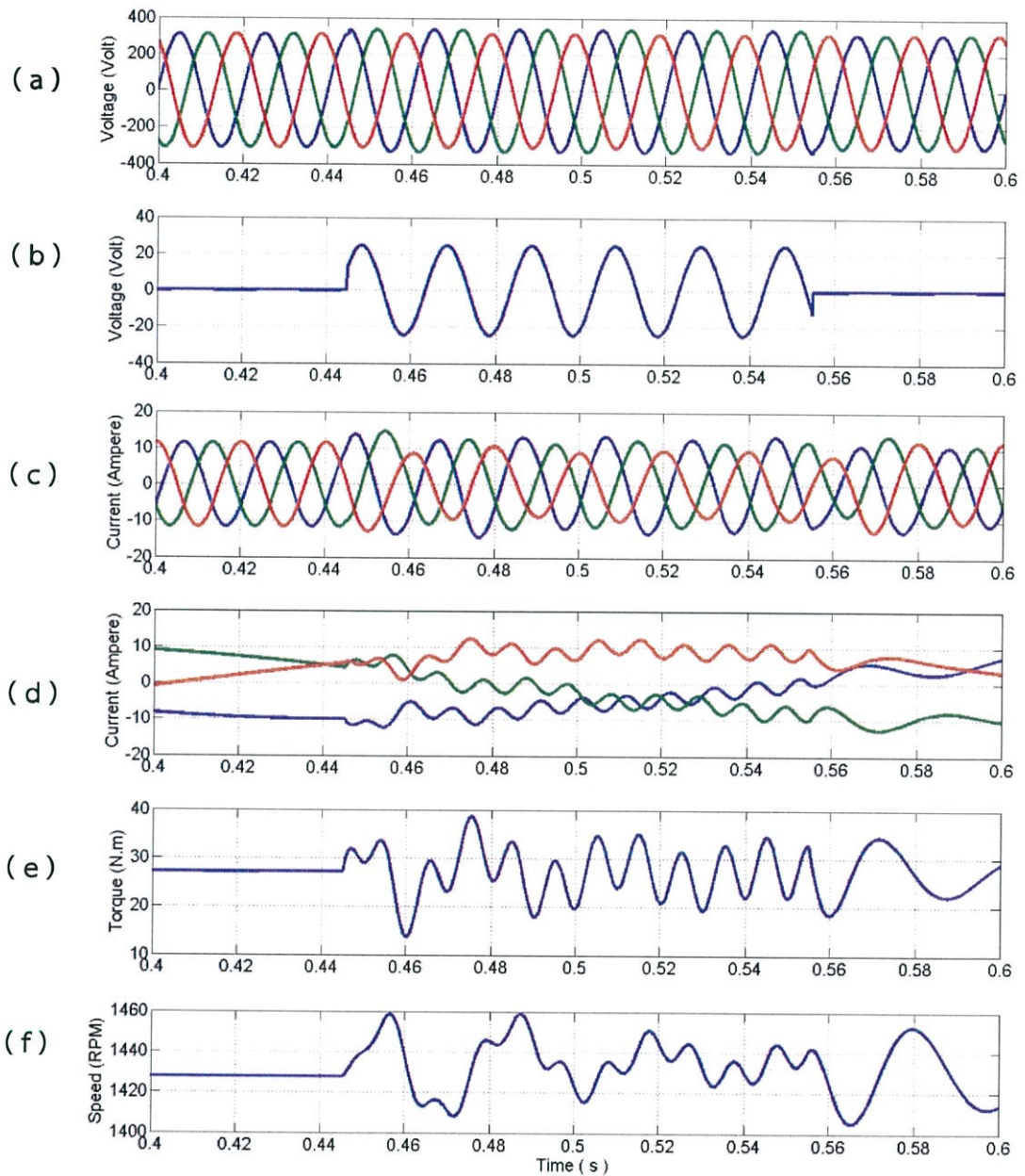
**รูปที่ 4.16** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.17** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.18** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเฟส C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  ส่วนเฟส A , B จะเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 237.4 * 1.414 = 335.68 \text{ V}$  ซึ่งเฟส A , B คือ เฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ 5%

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่า เป็นสัญญาณที่มีขนาดไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สมดุล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = V_b = 335.68 \text{ V}$  ,  $V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 335.68i + 335.68 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= 12.3 i + 21.304 j \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าในเฟส A , B จะมีขนาดสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ส่วนเฟส C จะมีขนาดต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และเฟส C จะมีสัญญาณที่ผิดเพี้ยนจากสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลมากกว่ากรณีแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

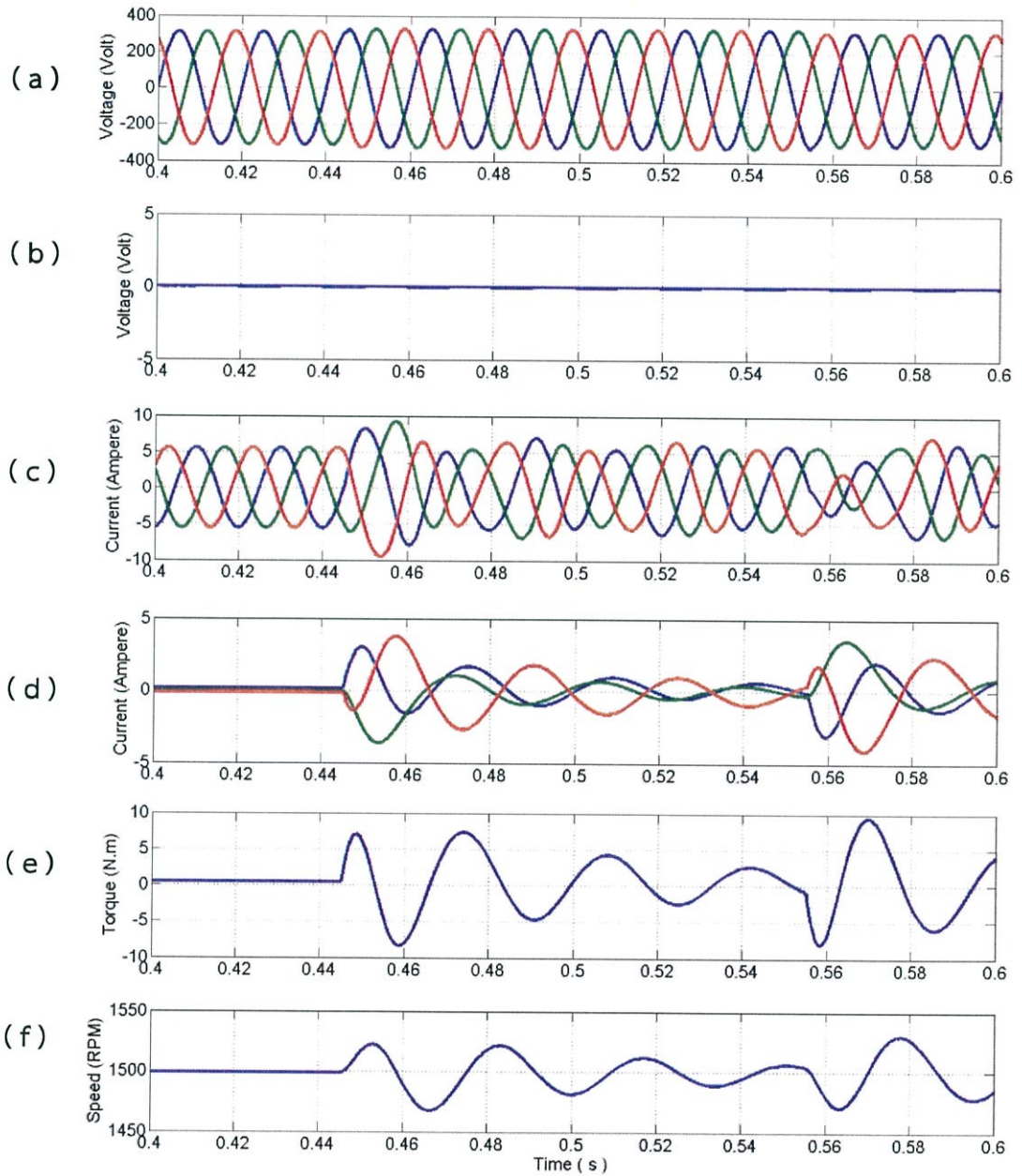
จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสัญญาณกระแสโรเตอร์จะมีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และเกิดสัญญาณที่ผิดเพี้ยนมากกว่ากรณีที่เกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์ มีค่าต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าพิกัดมอเตอร์

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์มีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

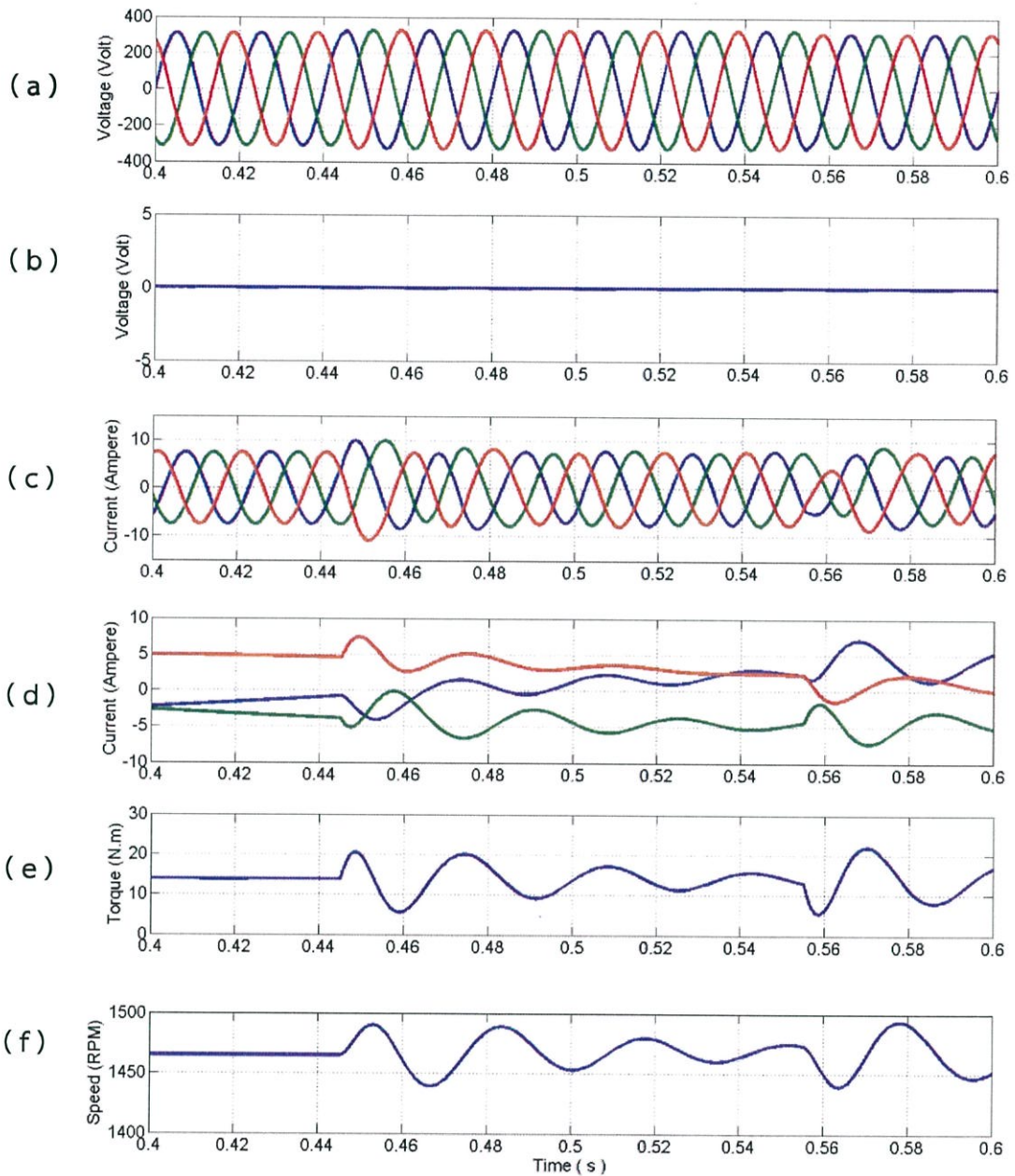
#### 4.1.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%



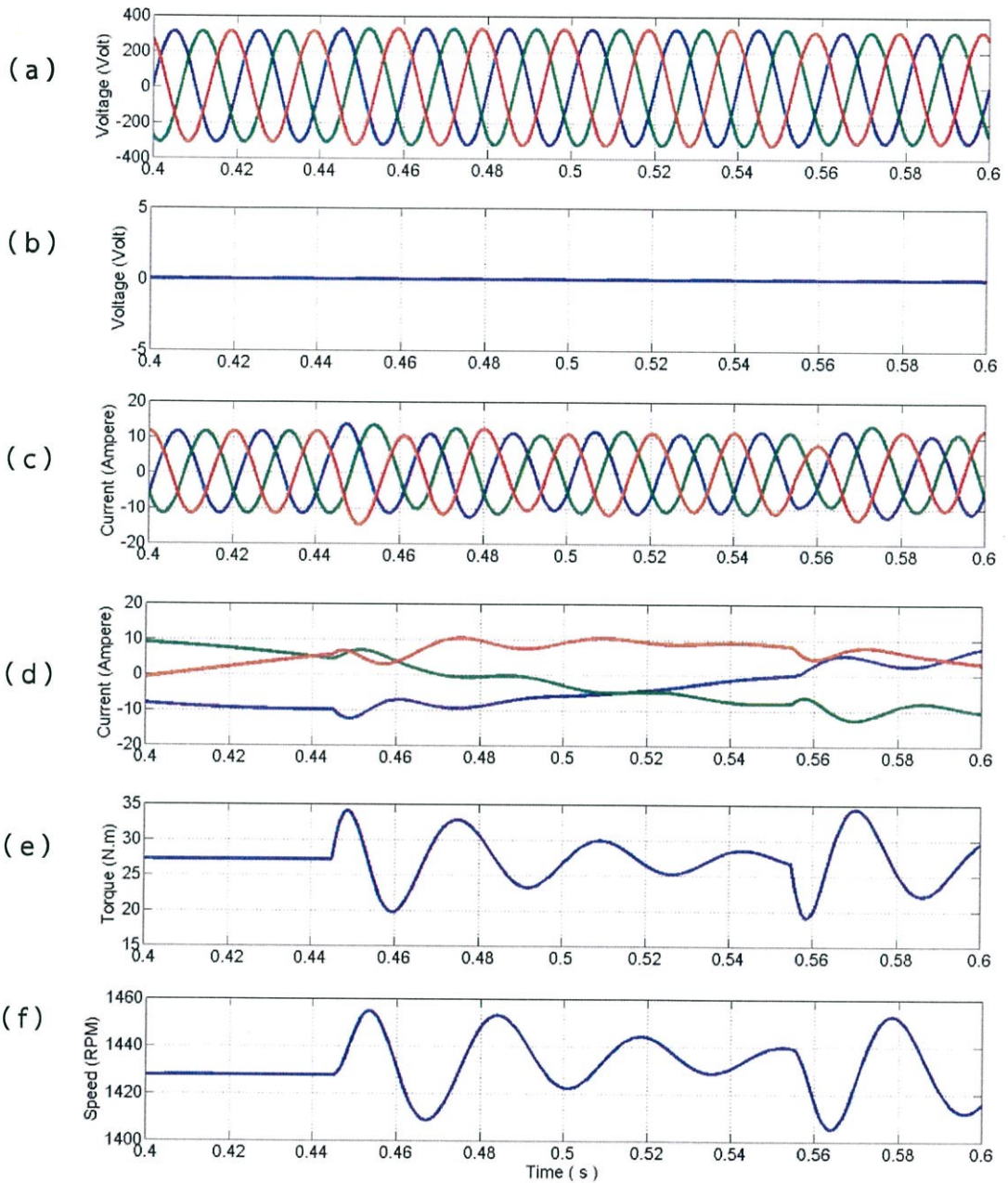
**รูปที่ 4.19** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.20 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A, B, C ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.21** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 231 \times 1.414 = 326.63 \text{ V}$

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเท่ากับศูนย์ตลอดทั้งช่วงเวลา เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลทั้งขนาด และมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาด  $V_a = V_b = V_c = 326.63 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 326.63i + 326.63 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 326.63 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากราฟจะมีลักษณะเหมือนกับกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่ต่างกันที่ขนาดกระแสสเตเตอร์มีค่าลดลง เพราะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าพิกัดมอเตอร์

จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากราฟจะมีลักษณะเหมือนกับกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่ต่างกันที่ขนาดกระแสโรเตอร์มีค่าลดลง เพราะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าพิกัดมอเตอร์

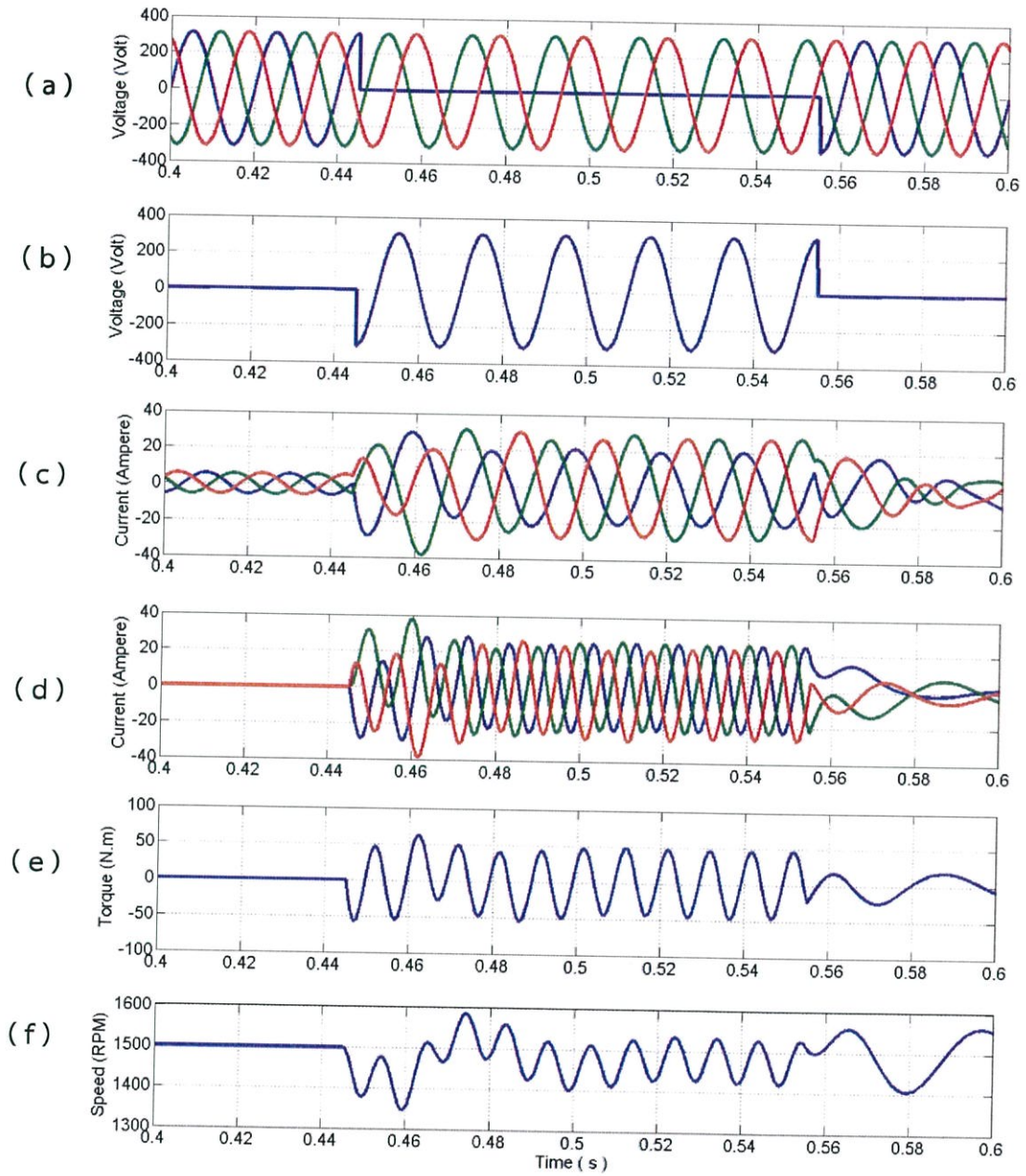
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย เนื่องจากค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าลดลง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

## 4.1.4 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

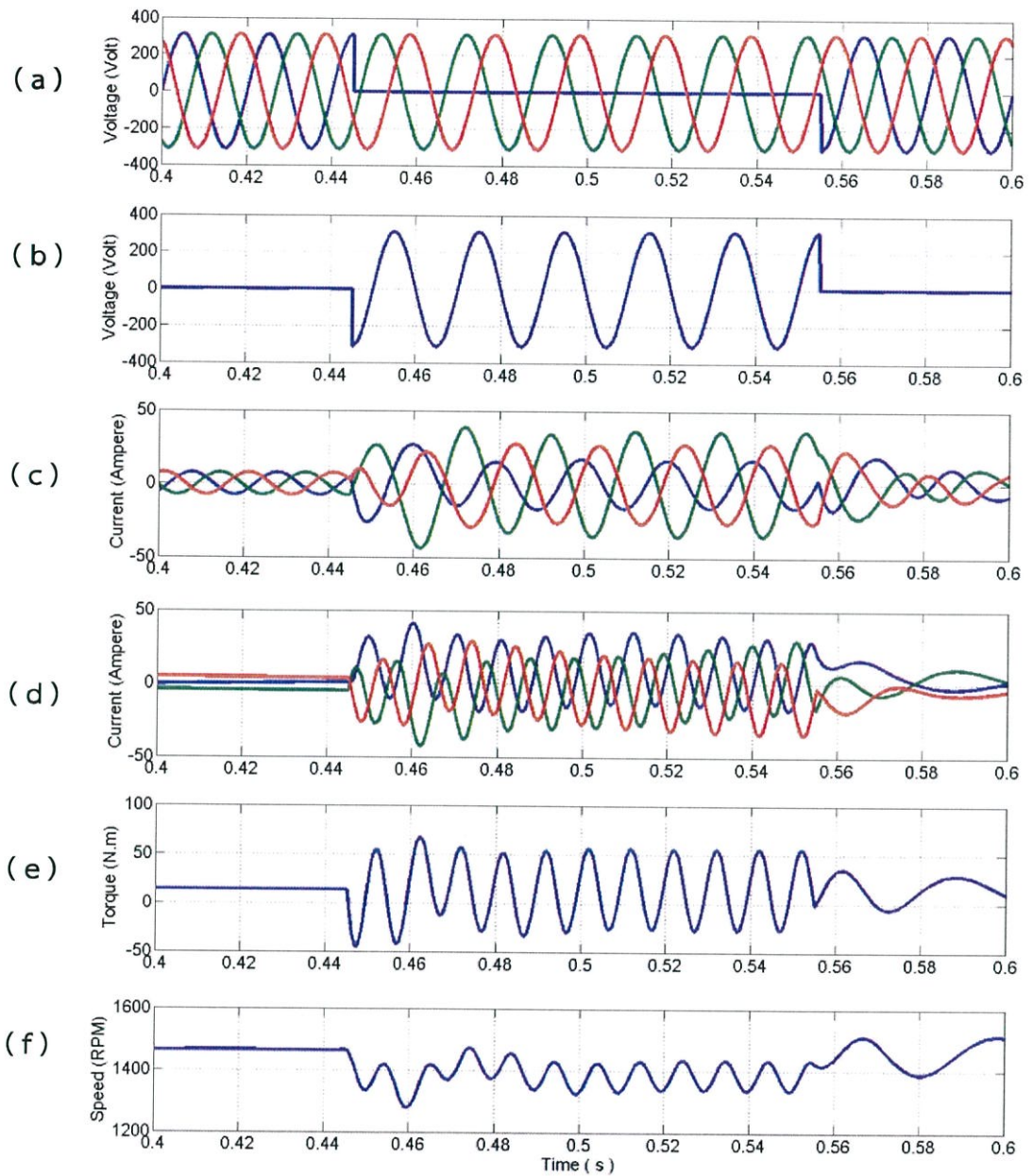
## 4.1.4.1 สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส

สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B, C ที่โหลด 0%



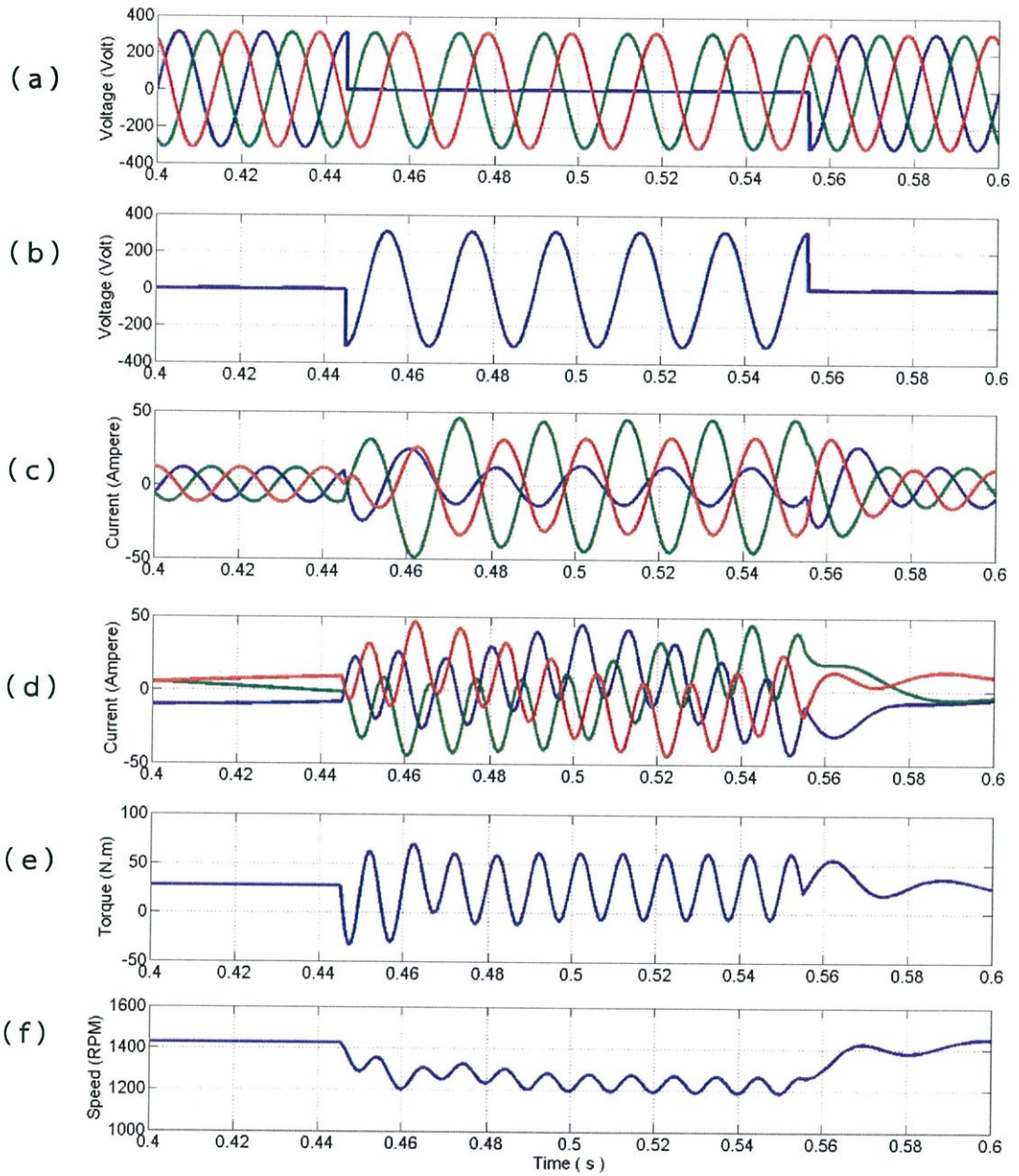
รูปที่ 4.22 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B , C ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.23** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B , C ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.24** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( b ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 ( c ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส ( d ) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 ( e ) แรงบิดของมอเตอร์ และ ( f ) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.4.1 สภาวะจ่ายแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเฟส B , C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  ส่วนเฟส A จะเป็นสัญญาณที่มีขนาดคงที่เท่ากับ  $0 \text{ V}$  ซึ่งเฟส A คือ เฟสที่ไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสจะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สมดุล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = 0 \text{ V}, V_b = V_c = 311.08 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 0 + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 311.08 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= -311.08 i \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสเตเตอร์ในเฟส A , B , C จะมีขนาดสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลมาก ซึ่งจะมีความรุนแรงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรณีที่ทำการศึกษา

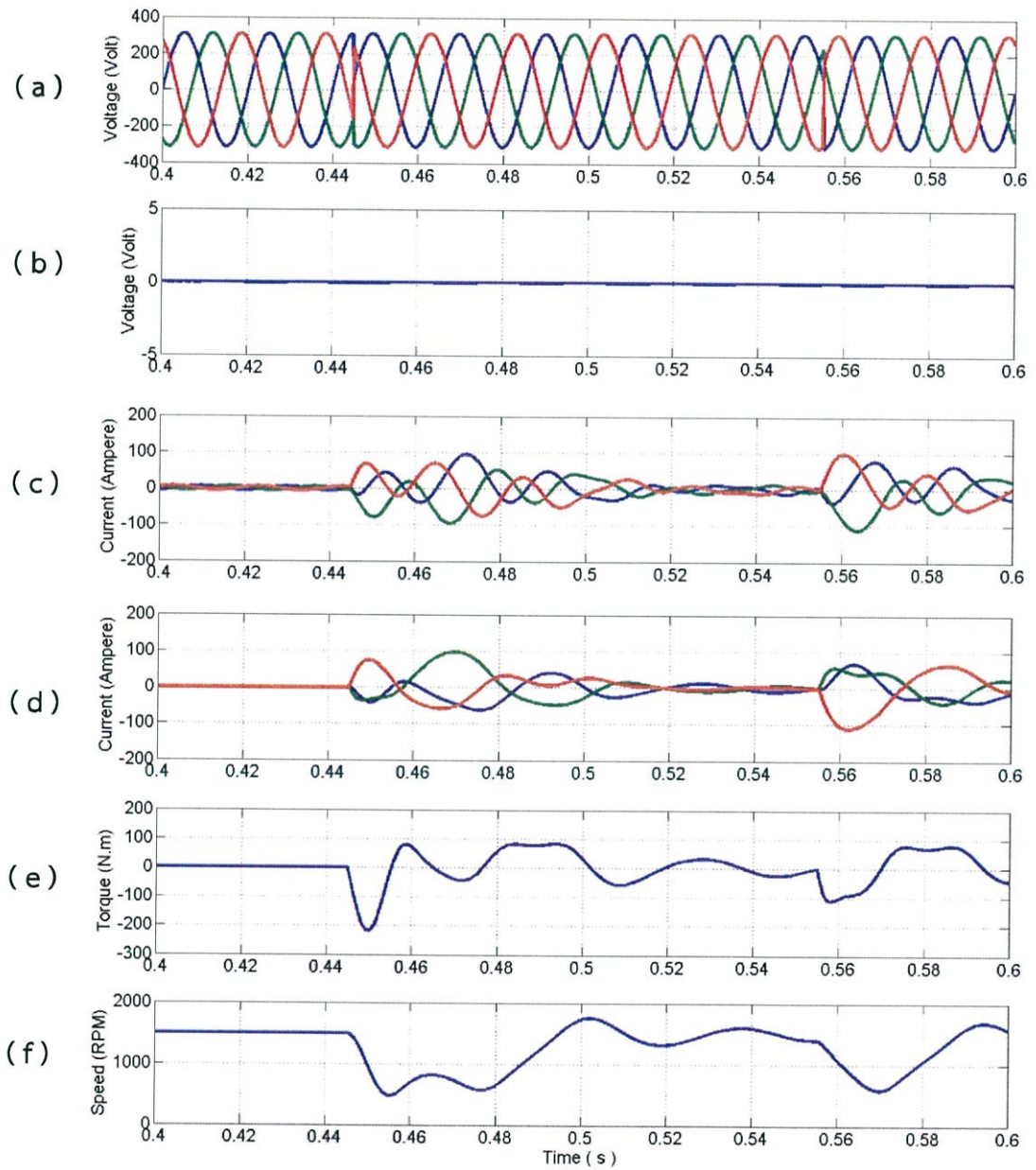
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลมาก และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าในกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลมาก และสัญญาณจะเกิดการกระเพื่อม เนื่องจากค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นมา ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

## 4.1.5 สภาวะความถี่ผิดปกติ

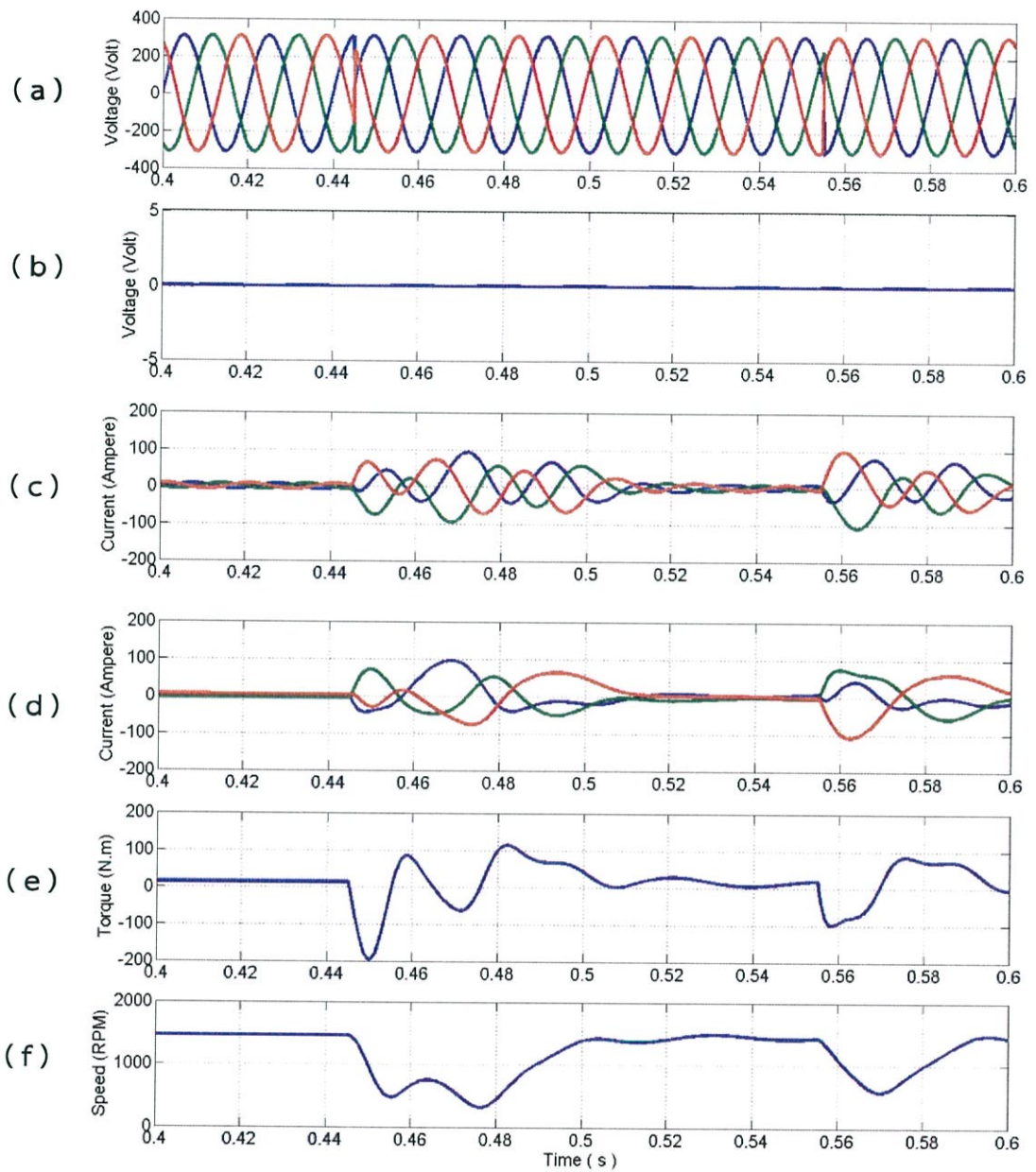
## 4.1.5.1 สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1%

สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 0%



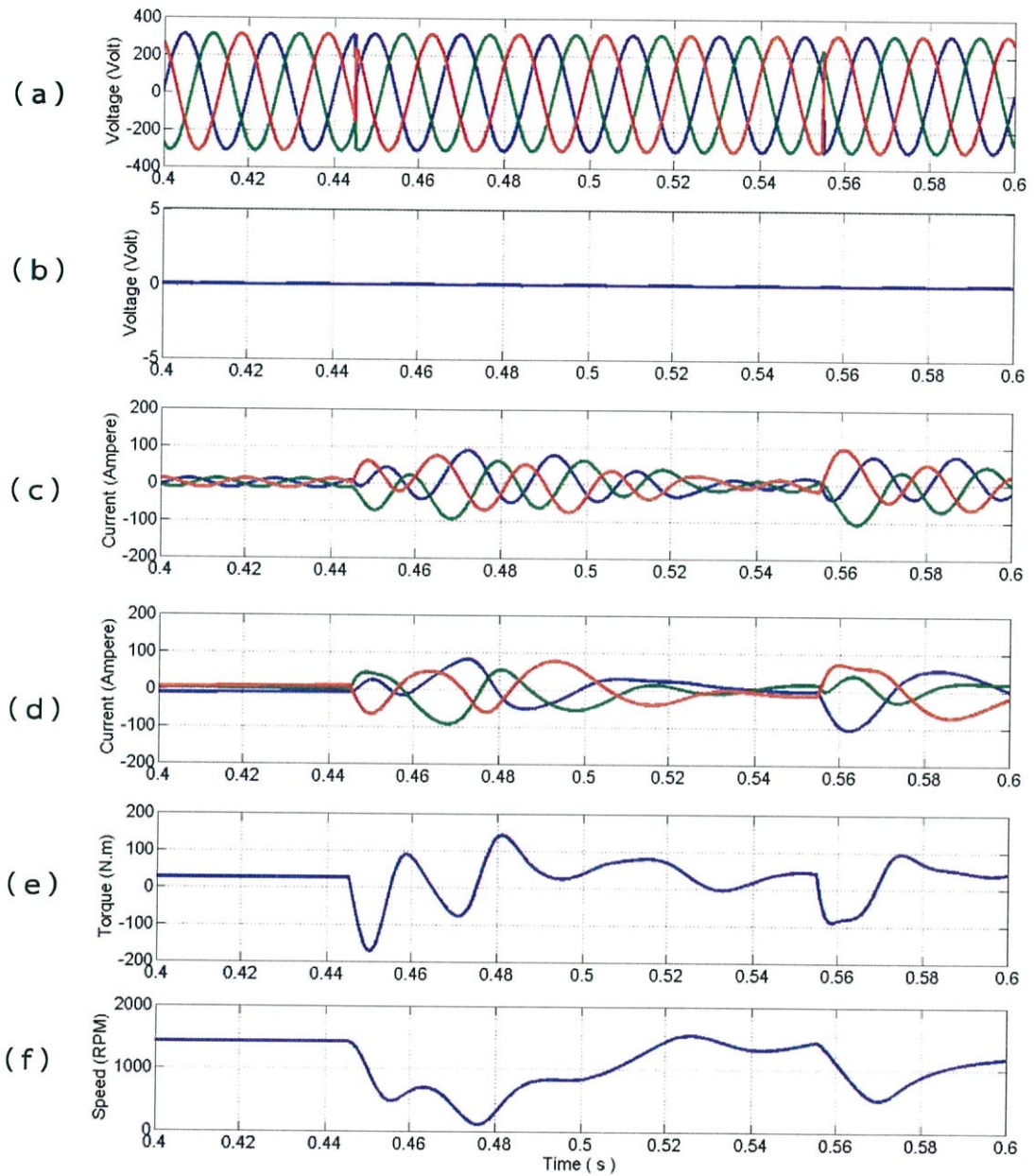
**รูปที่ 4.25** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.26** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.27** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.5.1 สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  เหมือนกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่สัญญาณมีความถี่ 49.5 Hz

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเท่ากับศูนย์ตลอดทั้งช่วงเวลา เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลทั้งขนาด และมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อมีขนาด  $V_a = V_b = V_c = 326.63 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 326.63i + 326.63\left(-\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) + 326.63\left(-\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสเตเตอร์ในเฟส A , B , C จะมีขนาดสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และสัญญาณจะมีความถี่ 49.5 Hz เนื่องจากพลาซที่สร้างกระแสจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-45 )

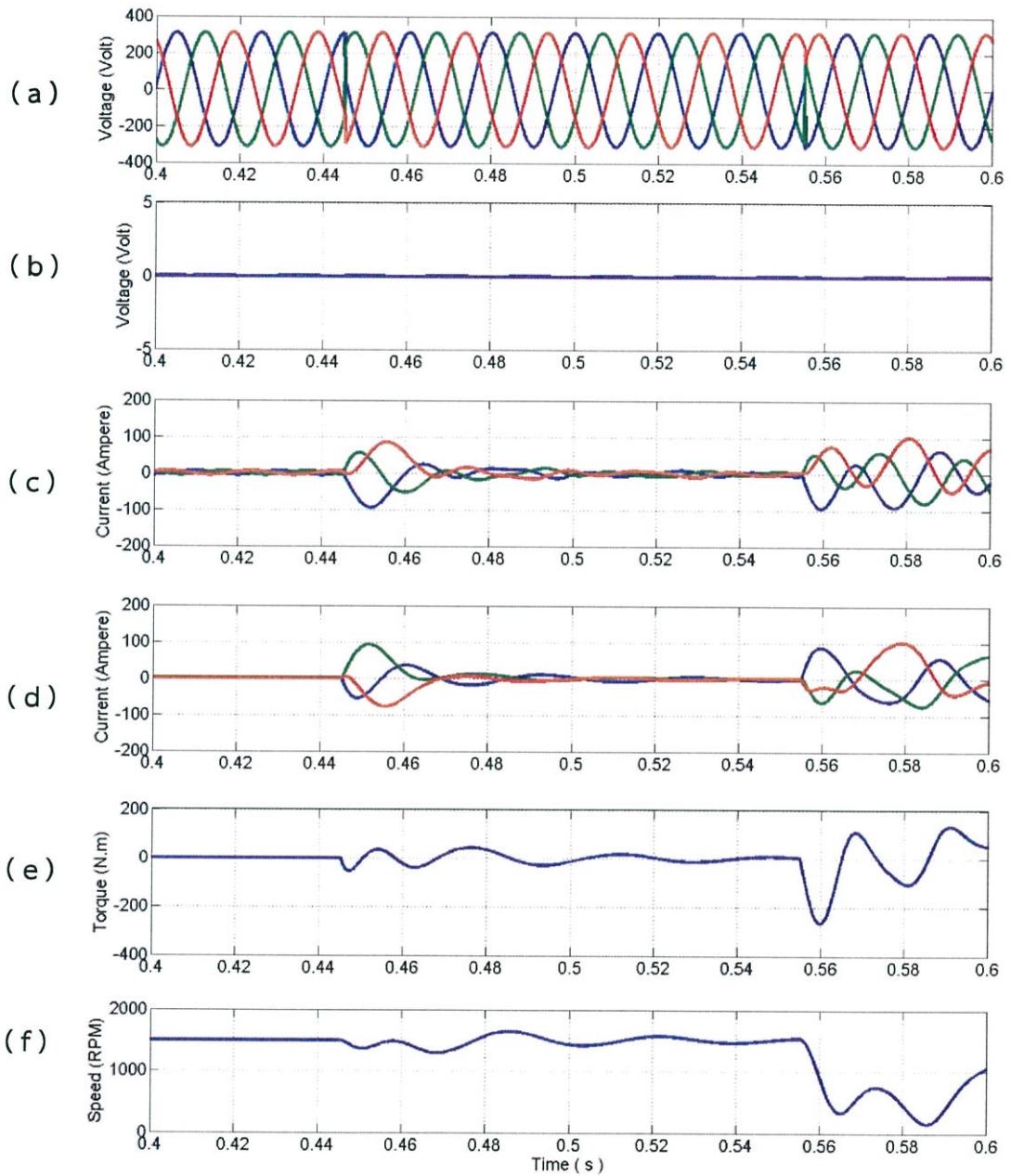
จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสโรเตอร์ในเฟส A , B , C จะมีขนาดสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และสัญญาณมีความถี่ 49.5 Hz

จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-2 )

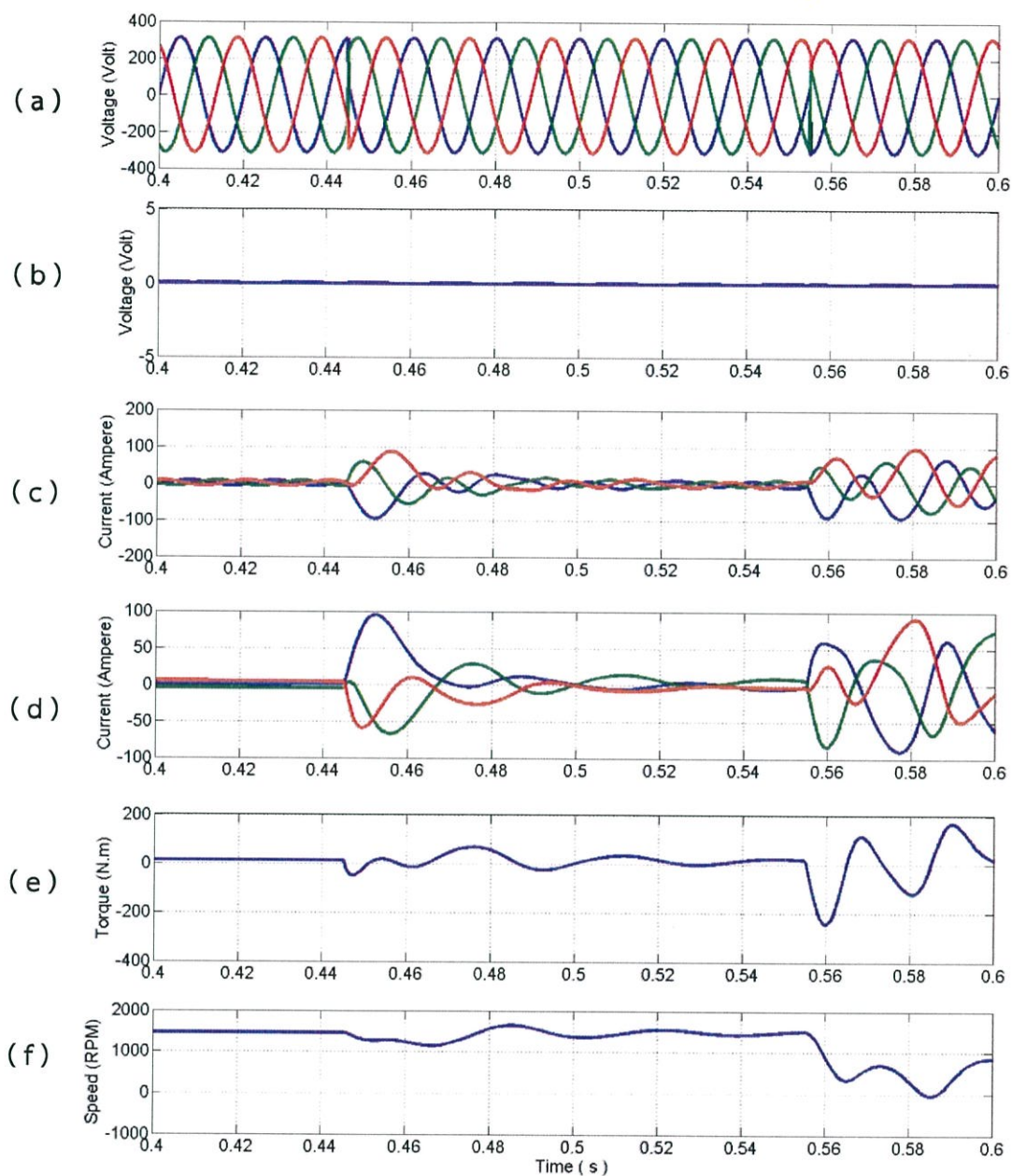
## 4.1.5.2 สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1%

สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 0%



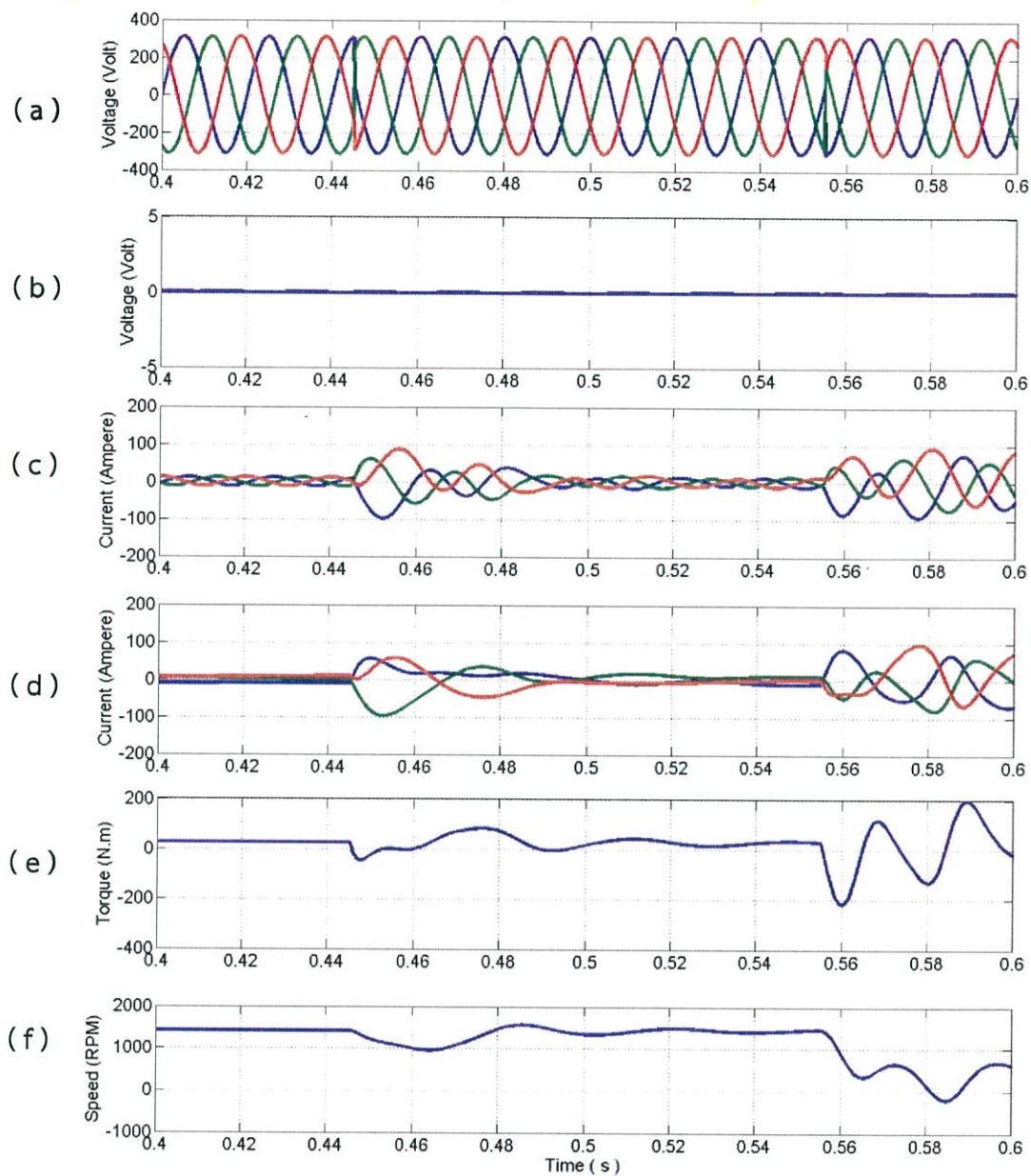
รูปที่ 4.28 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.29** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.30 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.5.2 สภาวะความถี่สูงกว่าปกติ 1% จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่า เฟส A , B , C เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด  $V(\text{peak}) = 311.08 \text{ V}$  แต่สัญญาณมีความถี่ 50.5 Hz

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเท่ากับศูนย์ตลอดทั้งช่วงเวลา เนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความสมดุลทั้งขนาด และมุม ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 4-1 )

เมื่อขนาดของ  $V_a = V_b = V_c = 326.63 \text{ V}$  ;

$$\begin{aligned} V_{\text{sum}}(t) &= 326.63i + 326.63 \left( -\frac{1}{2}i + \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) + 326.63 \left( -\frac{1}{2}i - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสเตเตอร์ในเฟส A , B , C จะมีขนาดต่ำกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แต่สัญญาณมีความถี่ 50.5 Hz เนื่องจากฟลักซ์ที่สร้างกระแสจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-45 )

จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่ากระแสโรเตอร์ในเฟส A , B , C จะมีขนาดต่ำกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย และสัญญาณมีความถี่ 50.5 Hz

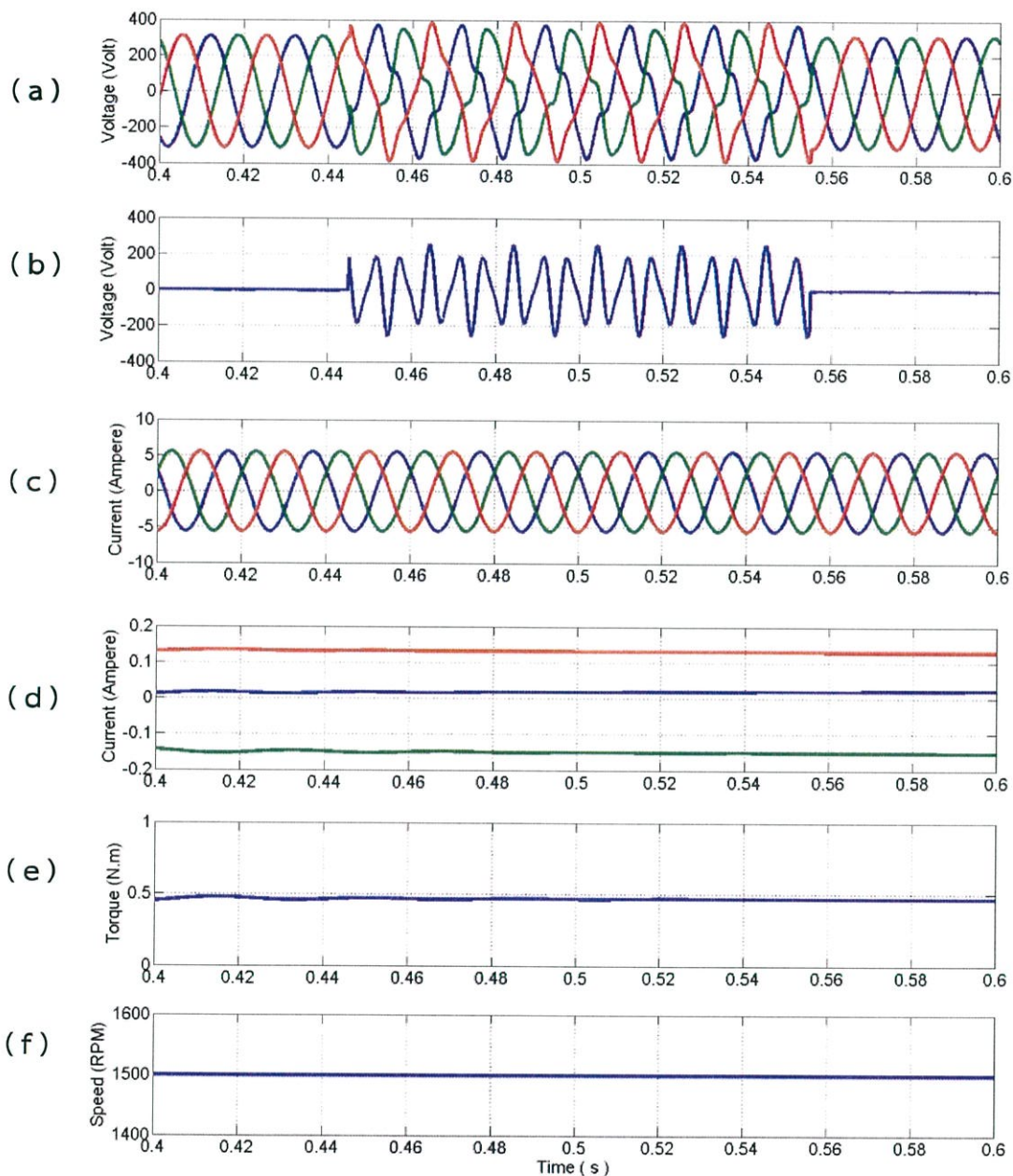
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ ( 2-2 )

## 4.1.6 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์

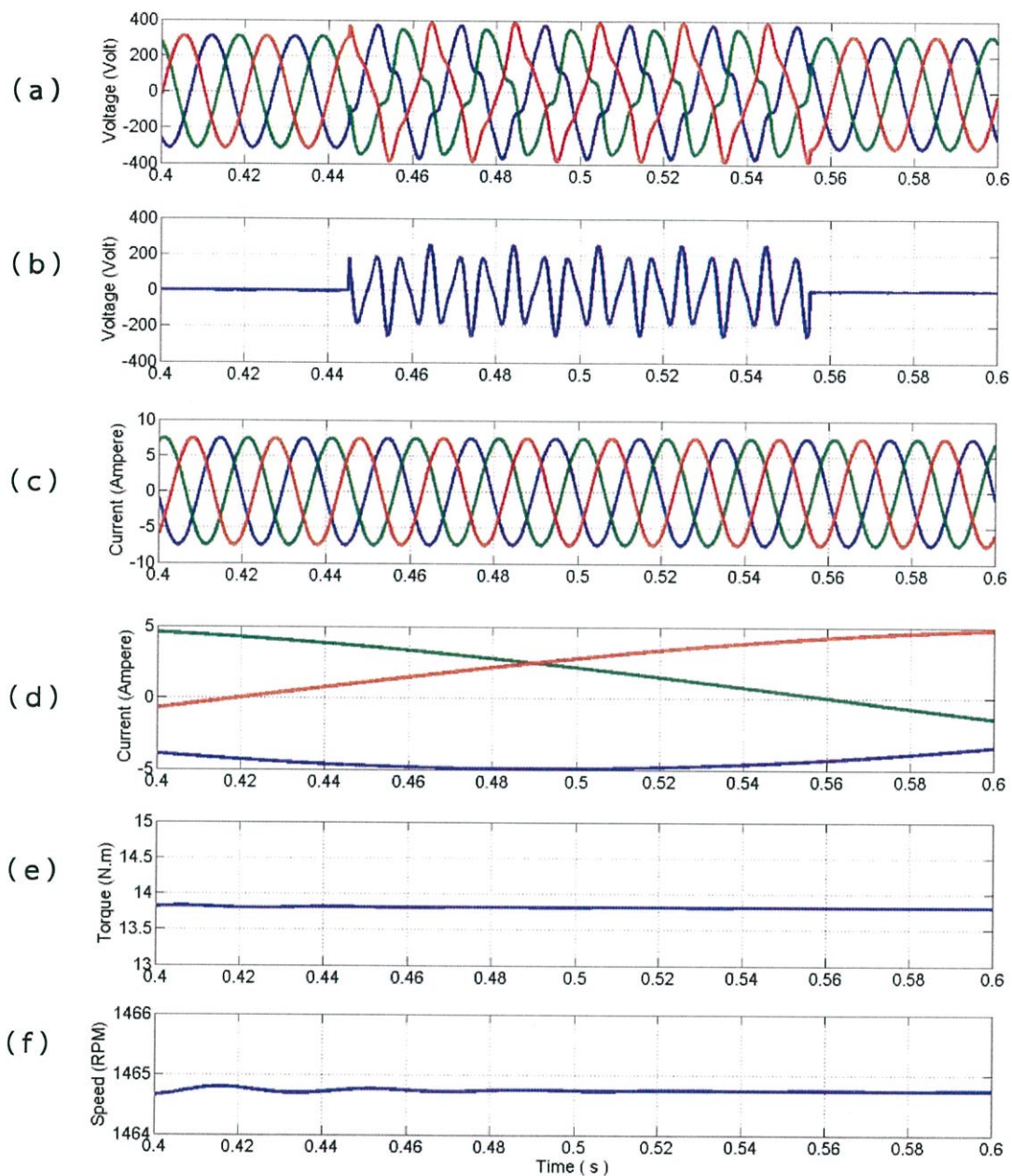
## 4.1.6.1 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 0%



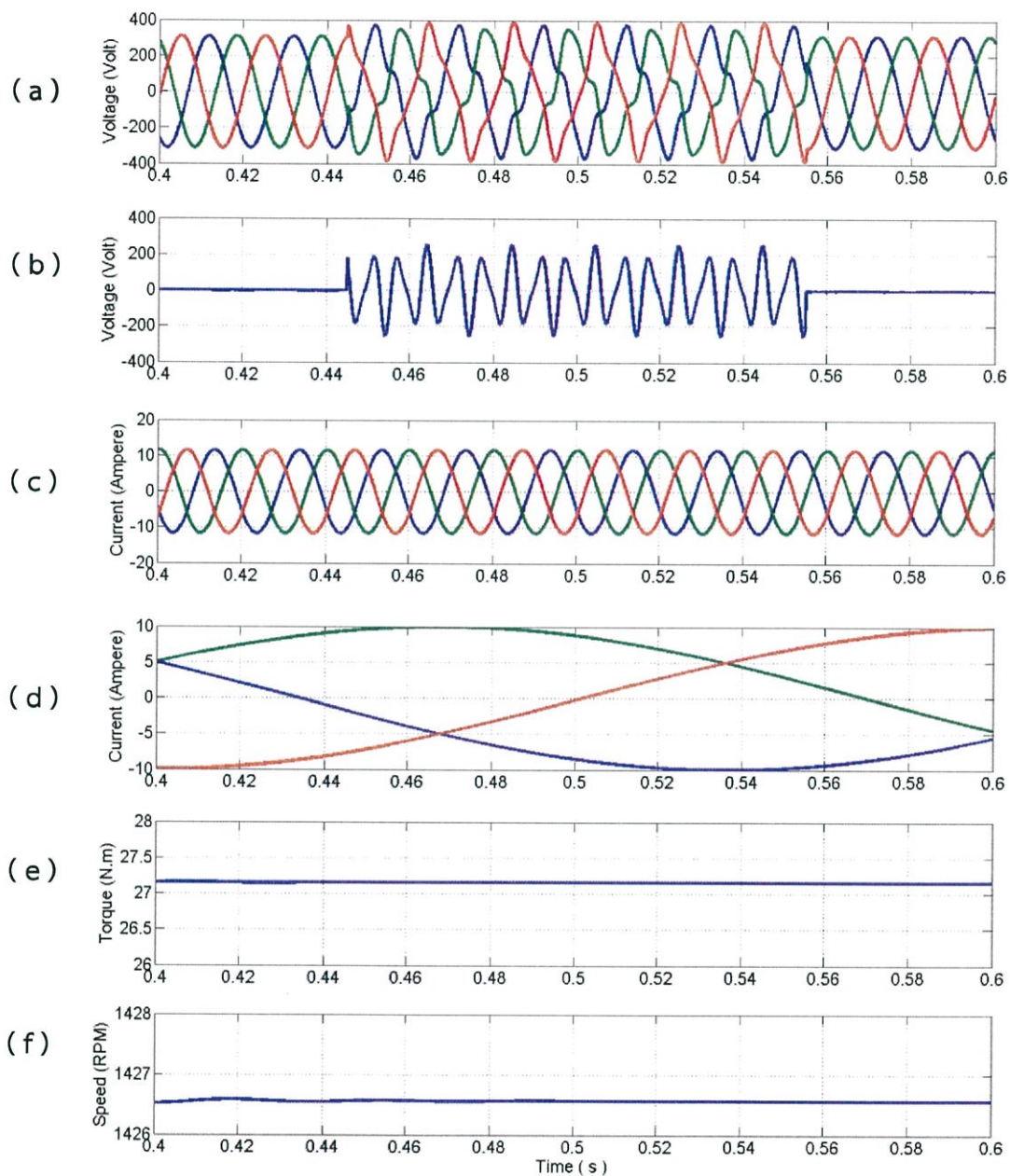
**รูปที่ 4.31** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.32** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

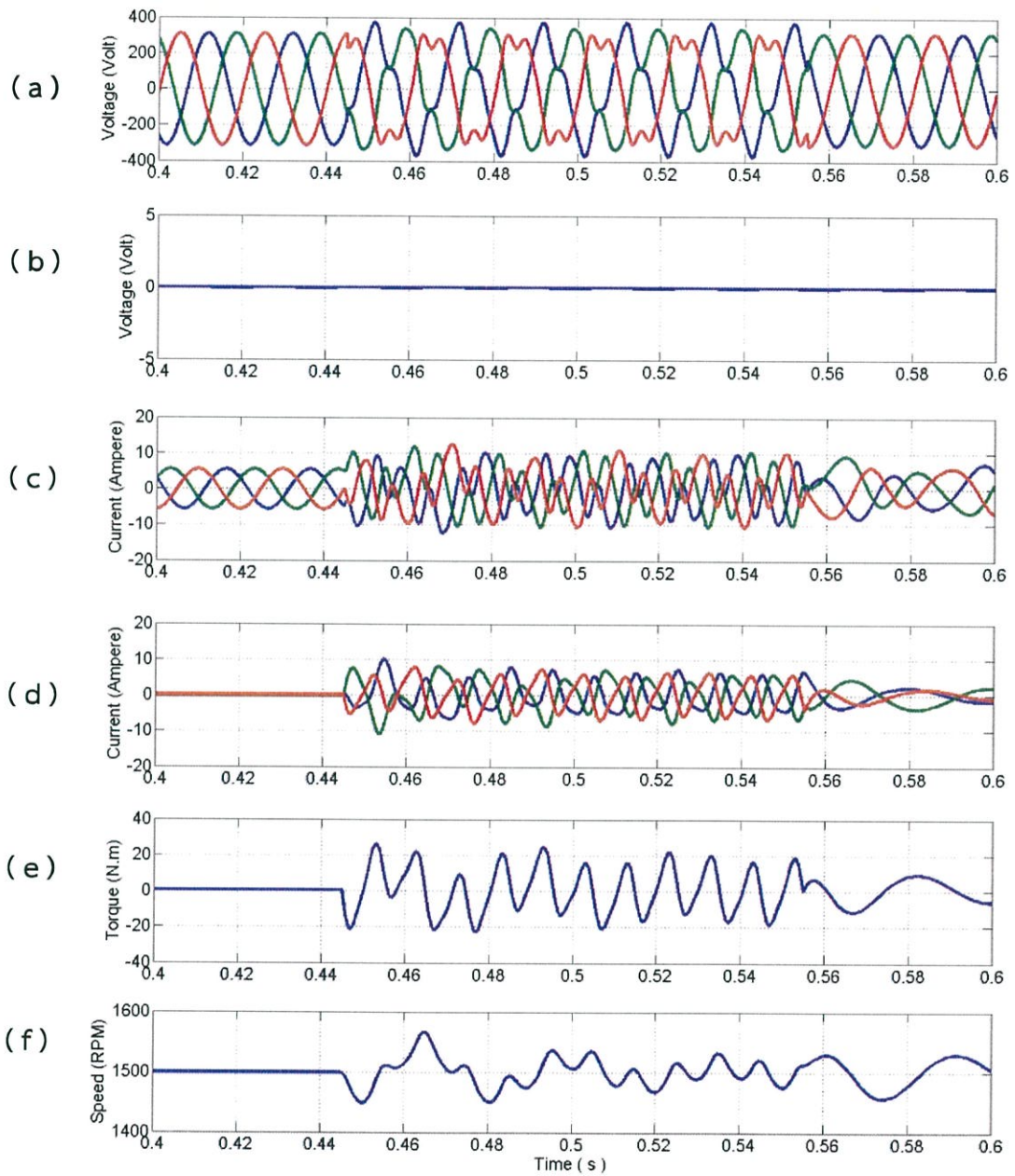
สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.33** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

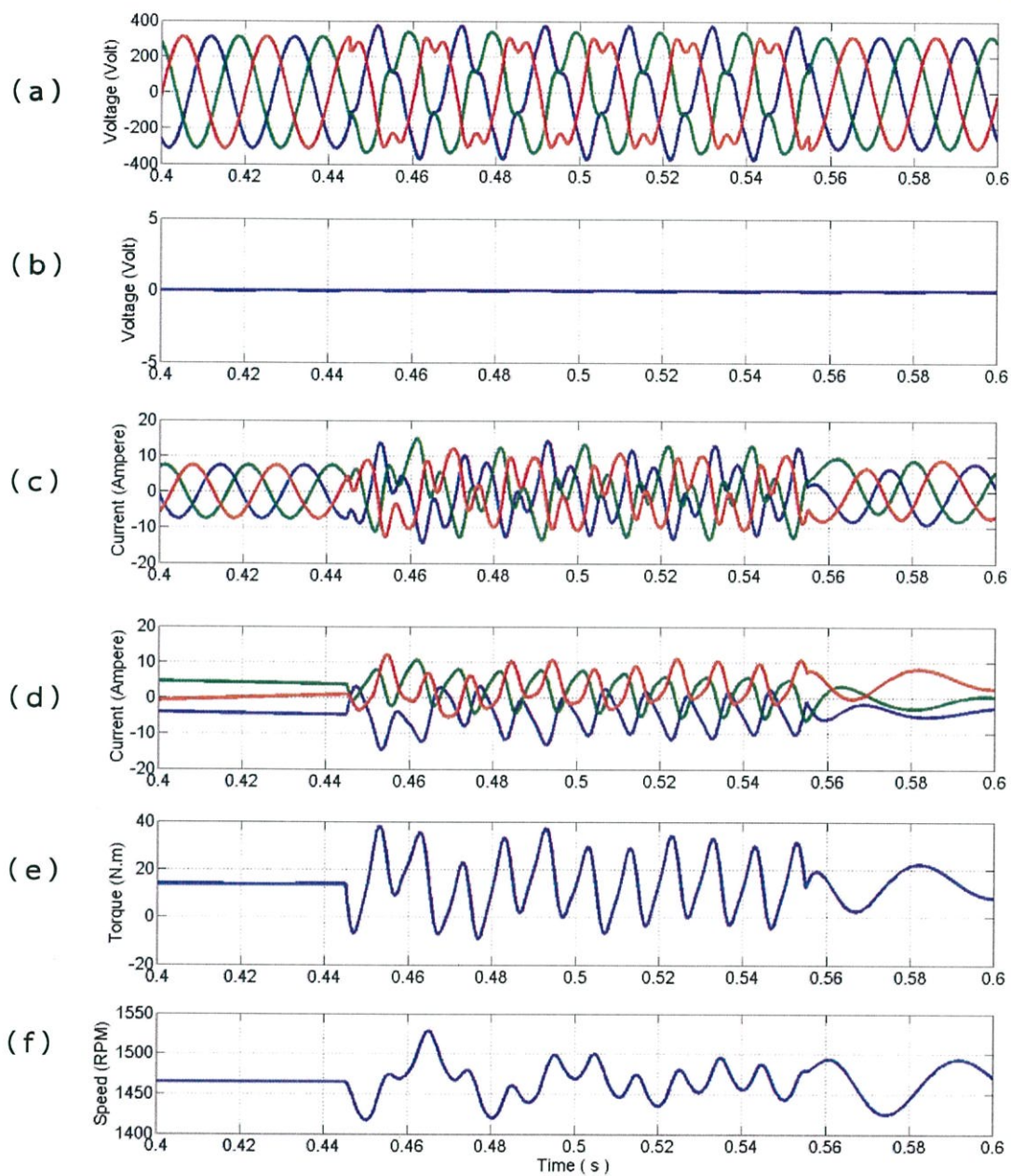
## 4.1.6.2 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 0%



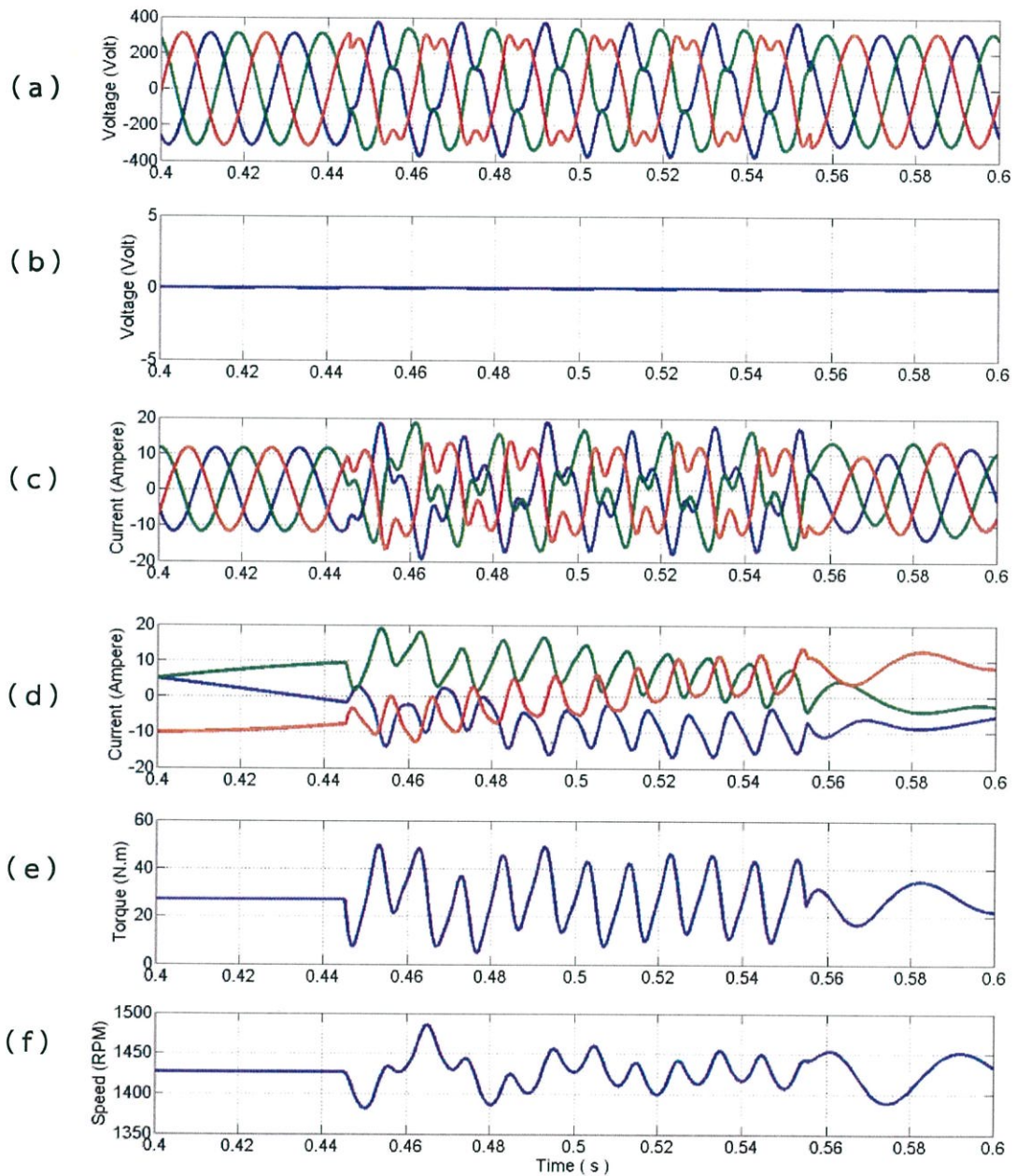
**รูปที่ 4.34** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.35** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

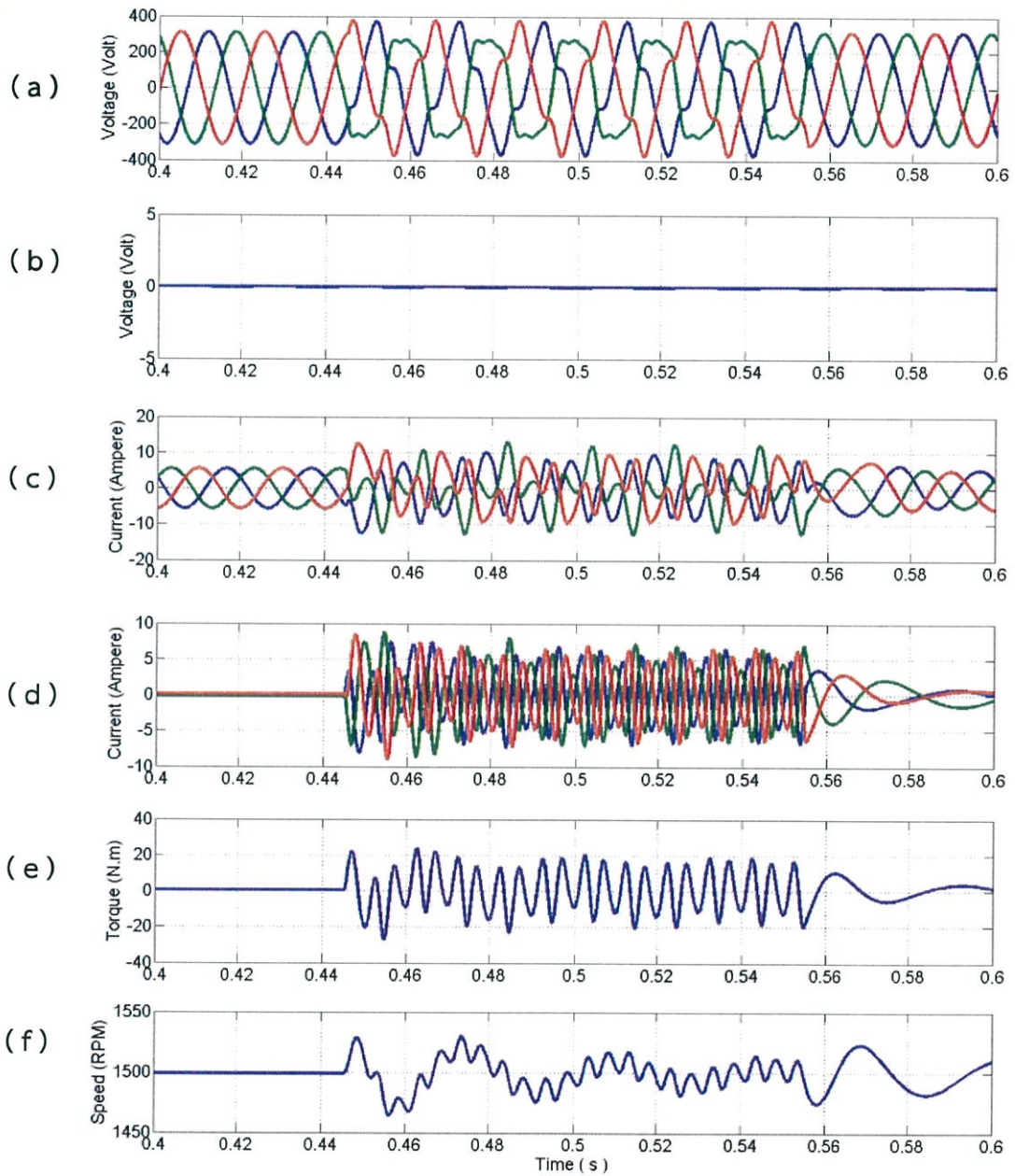
สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสบวก ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.36** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

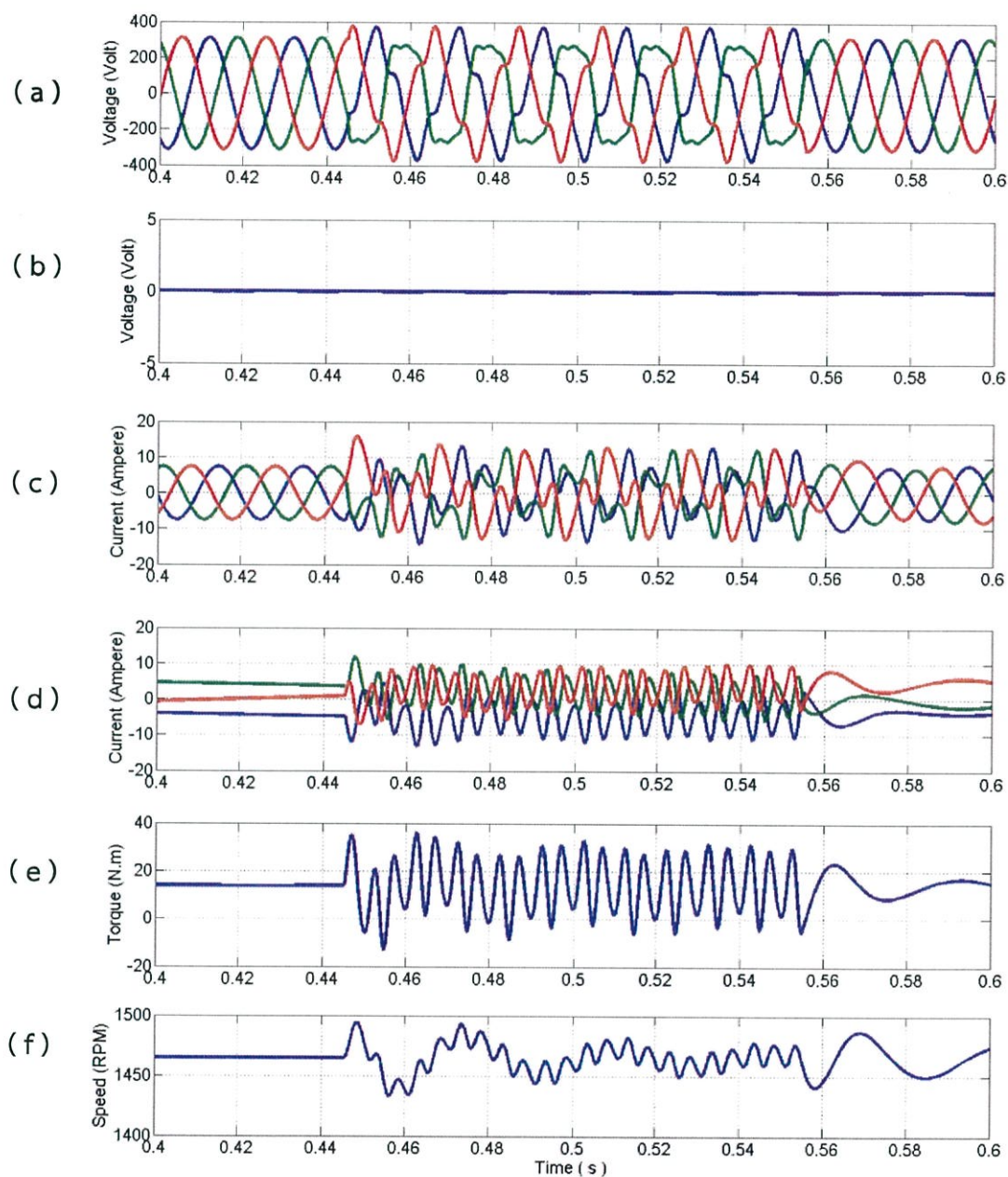
## 4.1.6.3 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 0%



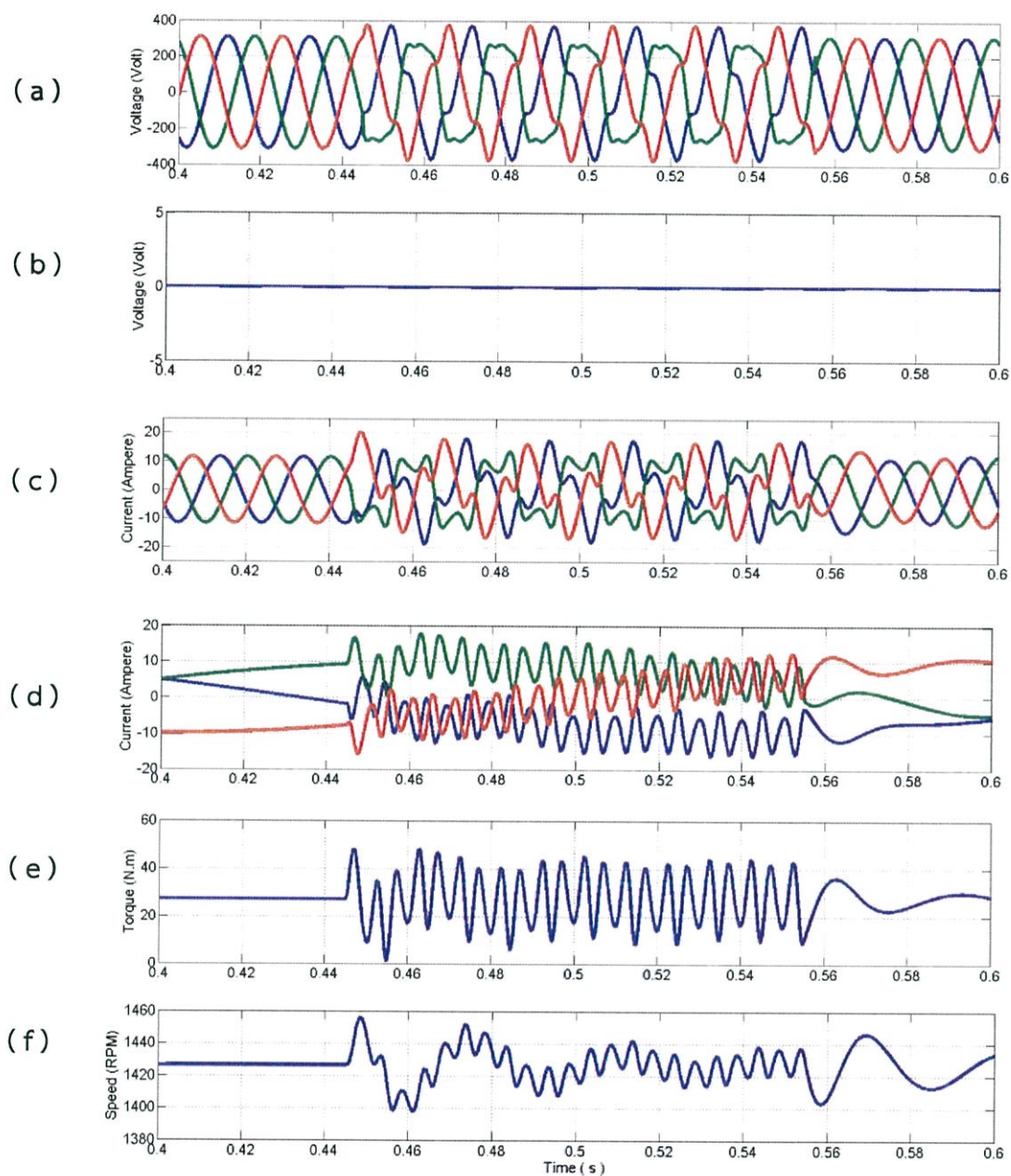
รูปที่ 4.37 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.38** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.39 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (b) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส  
 (c) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส (d) สัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส  
 (e) แรงบิดของมอเตอร์ และ (f) ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากหัวข้อ 4.1.6 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากกราฟ ( a ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะพบว่า สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ เฟสบวก และเฟสลบ สัญญาณจะมีลักษณะที่เกิดความผิดเพี้ยนไม่เป็นสัญญาณไซน์และมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล โดยที่ลักษณะของสัญญาณจะมีความแตกต่างกันไปตามลำดับเฟสที่เกิดขึ้น

จากกราฟ ( b ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส จะพบว่า สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์จะทำให้ระบบไม่สมดุล

จากกราฟ ( c ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟสจะมีลักษณะเหมือนกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก สัญญาณจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เพียงแต่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น โดยสัญญาณจะมีลักษณะใกล้เคียงมากที่สุดที่โหลด 100% และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ สัญญาณจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เพียงแต่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น โดยสัญญาณจะมีลักษณะใกล้เคียงมากที่สุดที่โหลด 100%

จากกราฟ ( d ) เป็นกราฟแสดงสัญญาณกระแสโรเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส จะพบว่าสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ สัญญาณจะมีลักษณะเหมือนกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ สัญญาณจะเกิดการกระเพื่อมขึ้น และมีขนาดสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

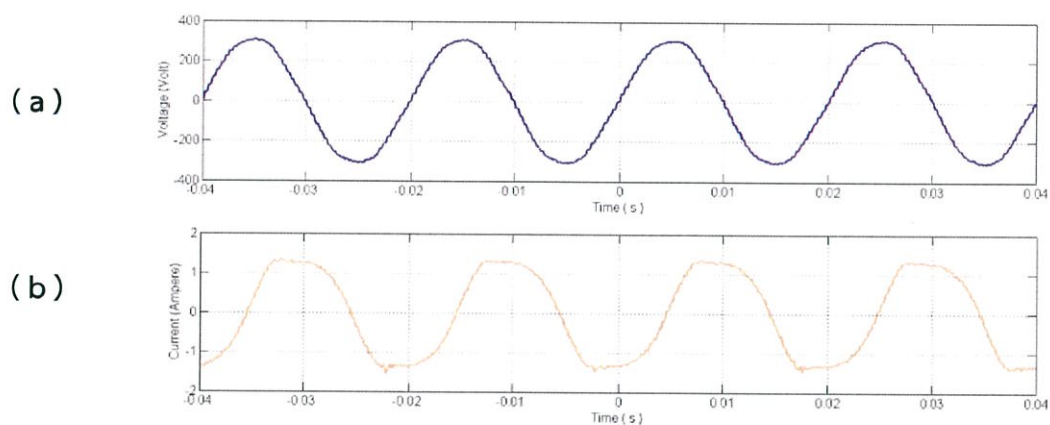
จากกราฟ ( e ) เป็นกราฟแสดงแรงบิดของมอเตอร์ จะพบว่าสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าโหลดที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหมือนกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ แรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ซึ่งจะมีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสโรเตอร์ ซึ่งแสดงได้จากสมการที่ ( 2-15 )

จากกราฟ ( f ) เป็นกราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ จะพบว่าสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางต้านกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน

## 4.2 ผลที่ได้จากการทดสอบ ( LAB TEST )

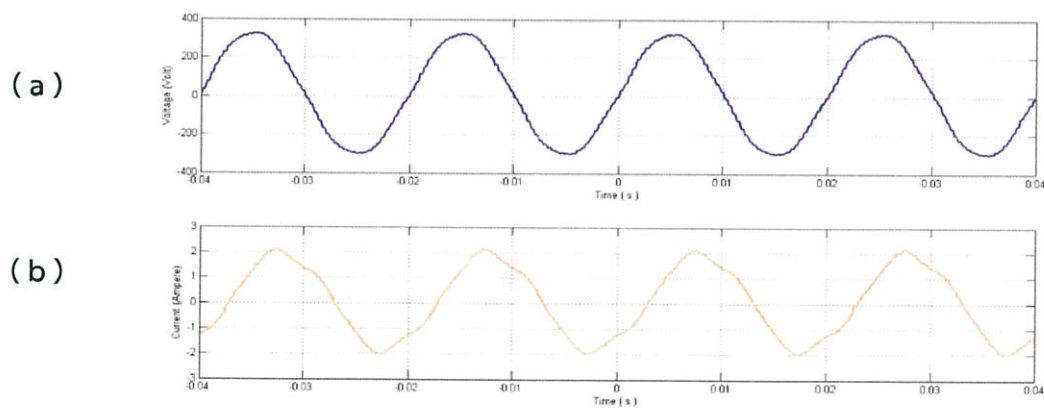
### 4.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0%



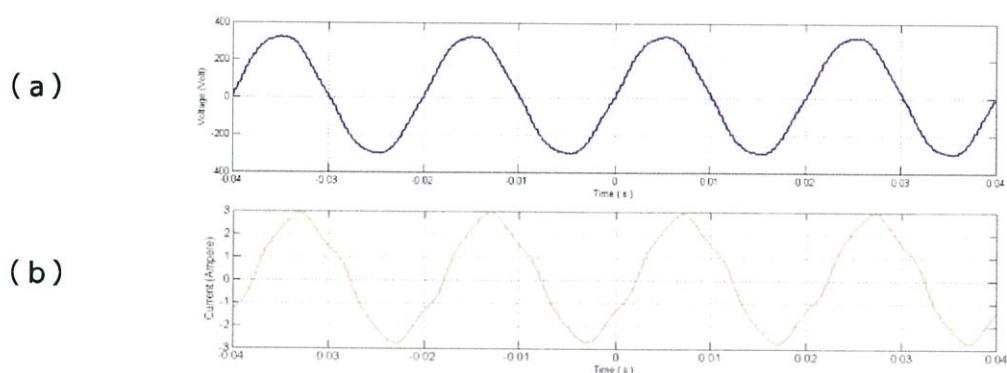
รูปที่ 4.40 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ ( b ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.41 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ ( b ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.42 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ ( b ) สัญญาณกระแสเสตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

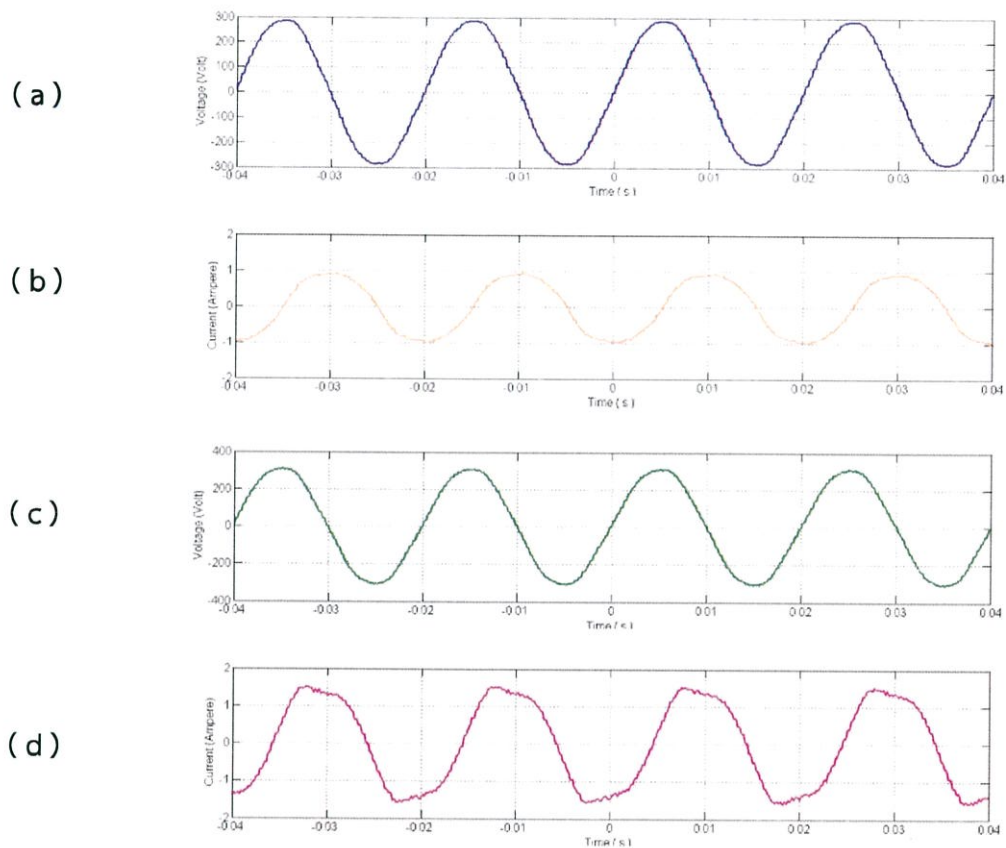
ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	
0	220	219.8	219.7	1.049	1.045	1.060	1499
50	220.1	220	219.7	1.381	1.361	1.352	1455
100	219.8	219.7	218.8	1.928	1.908	1.888	1407

## 4.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

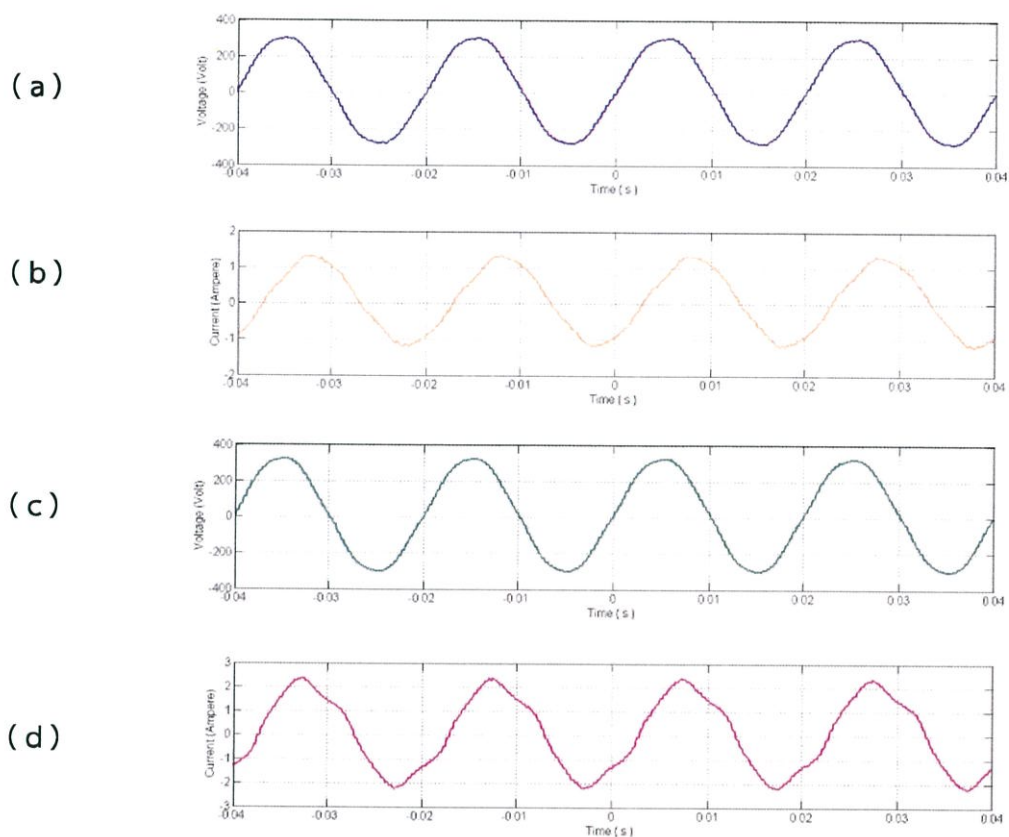
### 4.2.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%



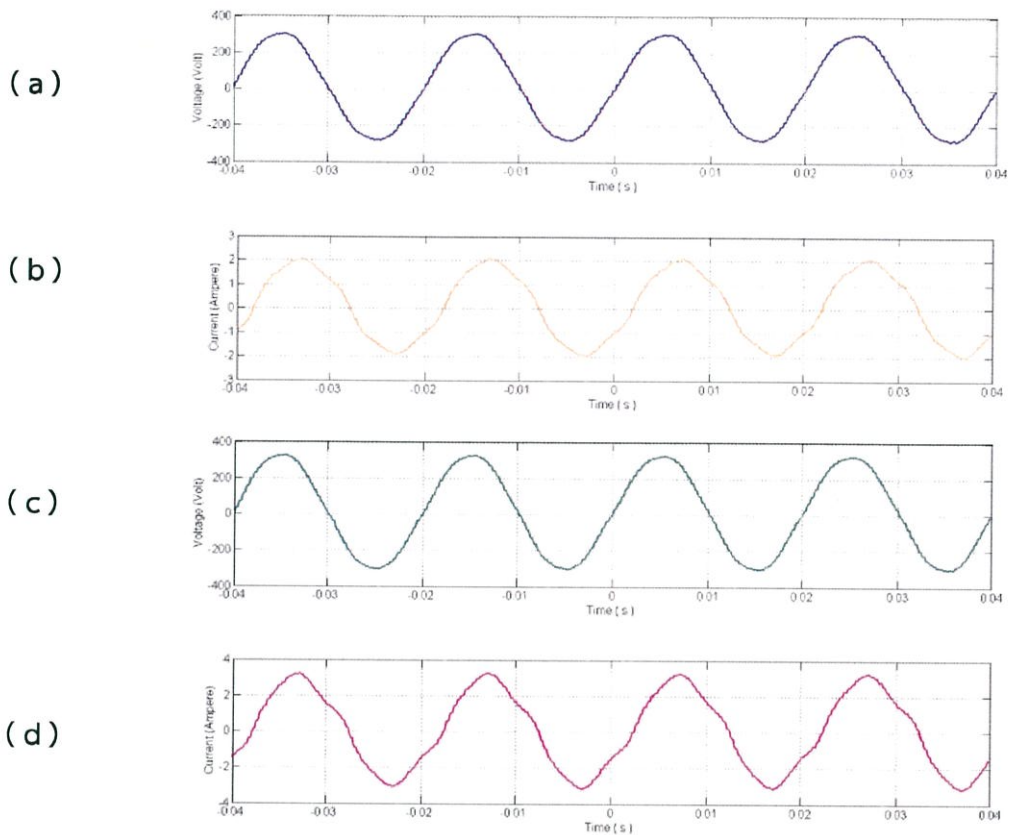
**รูปที่ 4.43** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A (b) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A (c) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ (d) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.44 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ ( d ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



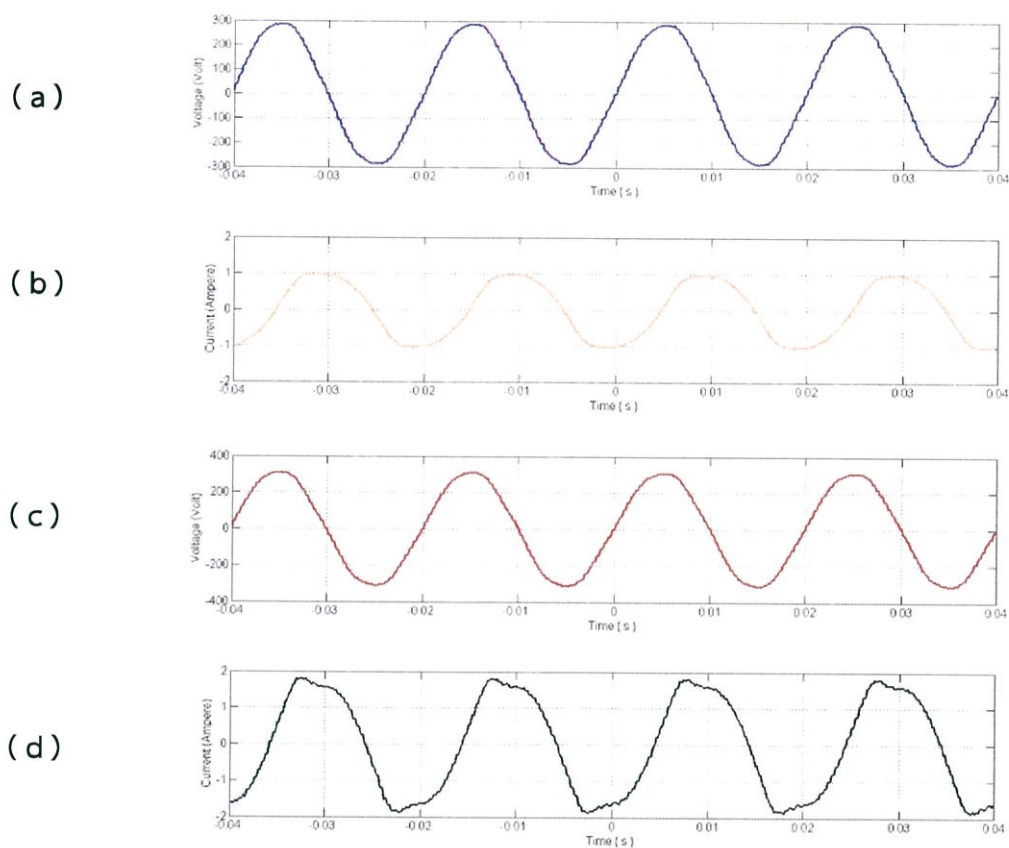
**รูปที่ 4.45** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ ( d ) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

**ตารางที่ 4.2** ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	
0	203.9	220	220	0.709	1.188	1.145	1499
50	205.9	221.9	221.6	0.879	1.585	1.609	1451
100	203.1	219.3	218.9	1.421	2.177	2.214	1400

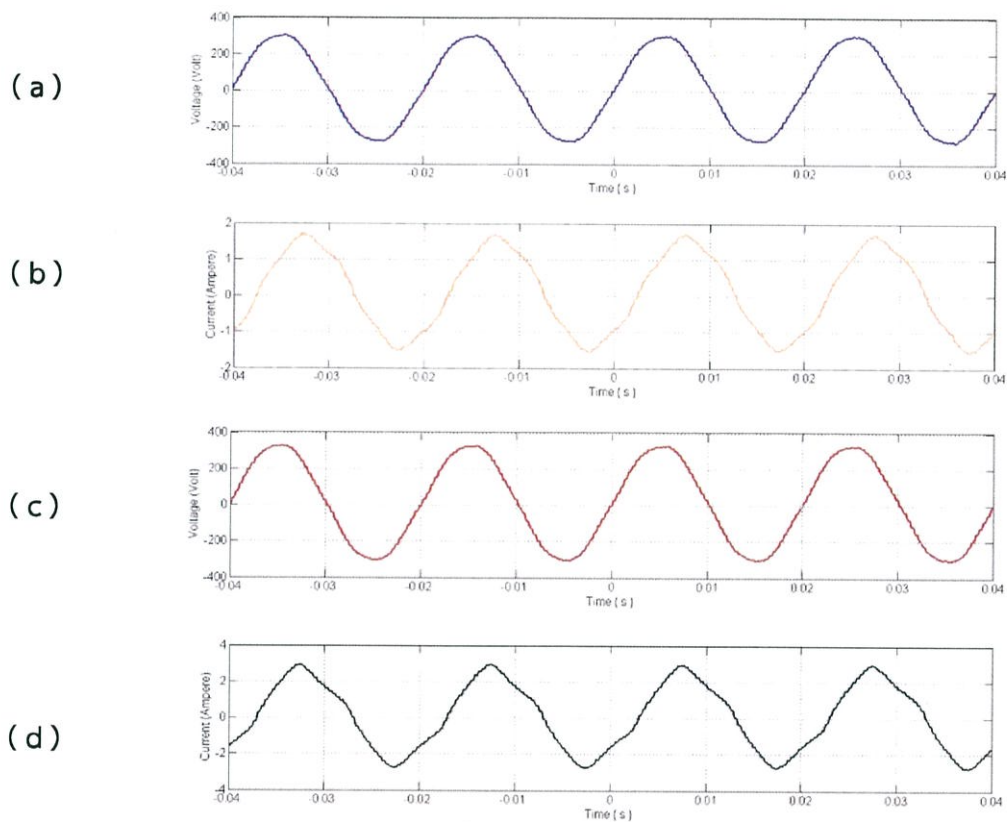
### 4.2.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 0%



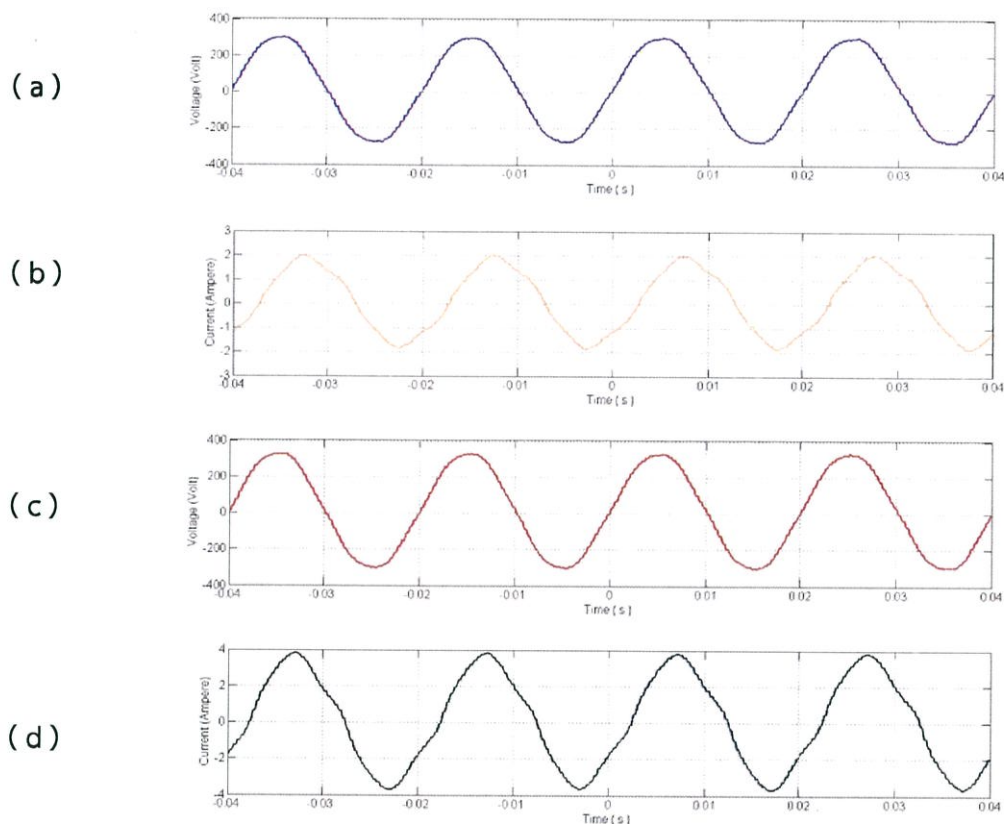
**รูปที่ 4.46** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A (b) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A (c) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ (d) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.47 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ ( d ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



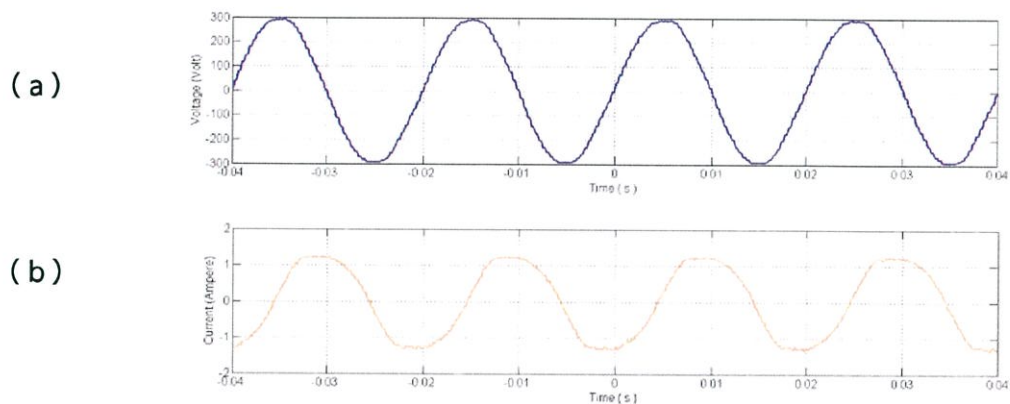
**รูปที่ 4.48** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ ( d ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

**ตารางที่ 4.3** ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	
0	204.3	204.3	220	0.755	0.828	1.314	1497
50	204.1	204.2	219.3	1.097	1.046	1.894	1445
100	203.4	203.8	220.3	1.682	1.623	2.507	1384

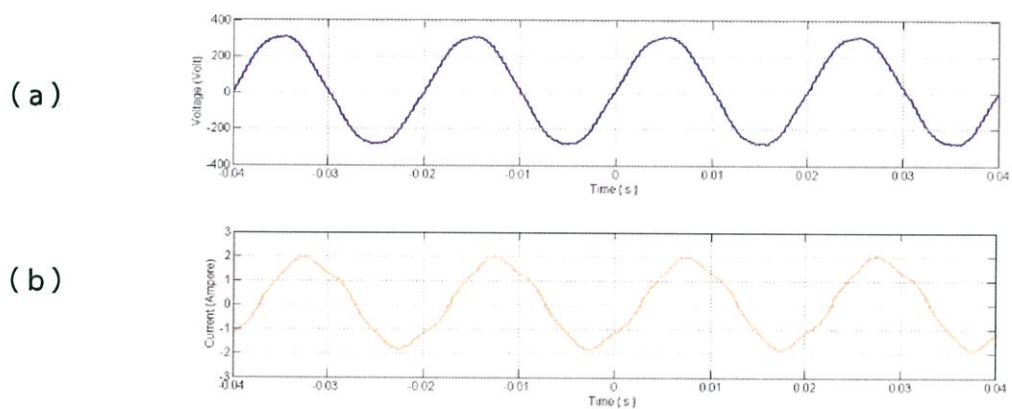
### 4.2.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%



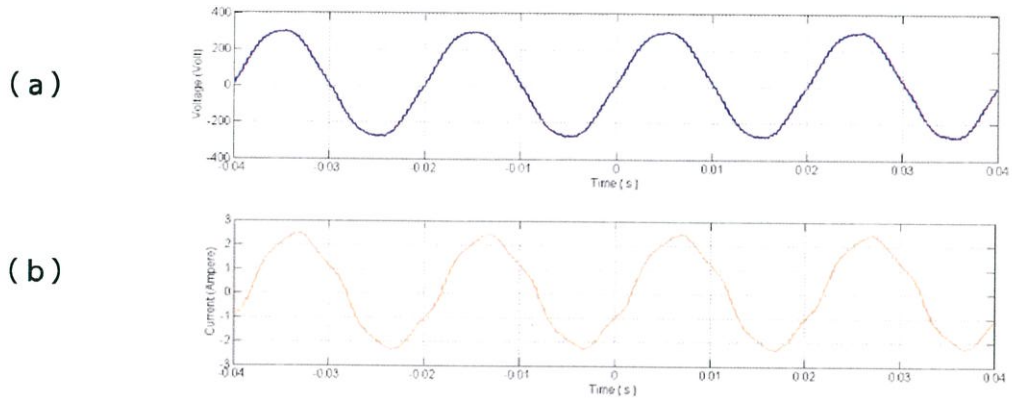
รูปที่ 4.49 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ (b) สัญญาณกระแสเสตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.50 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ (b) สัญญาณกระแสเสตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.51 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ ( b ) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

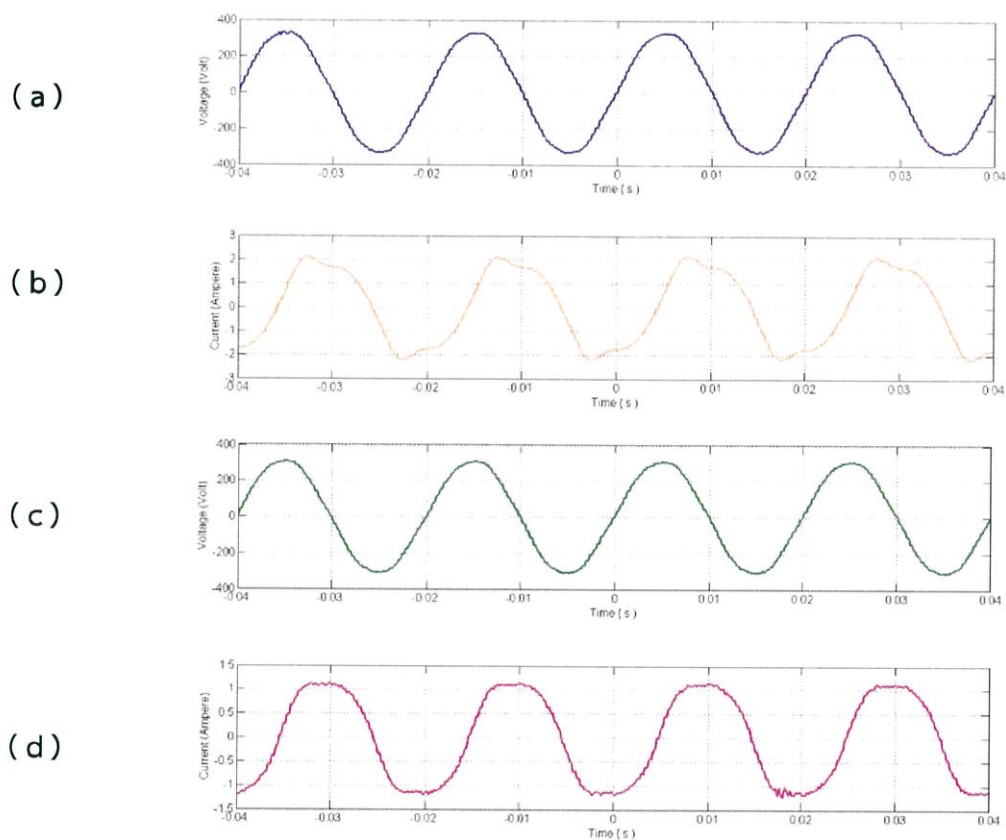
ตารางที่ 4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	I <sub>a</sub>	I <sub>b</sub>	I <sub>c</sub>	
0	209.4	209.1	209	0.995	0.913	0.988	1436
50	208.9	208.9	208.9	1.381	1.342	1.315	1441
100	208.7	209.1	208.9	1.942	1.9526	1.913	1381

### 4.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

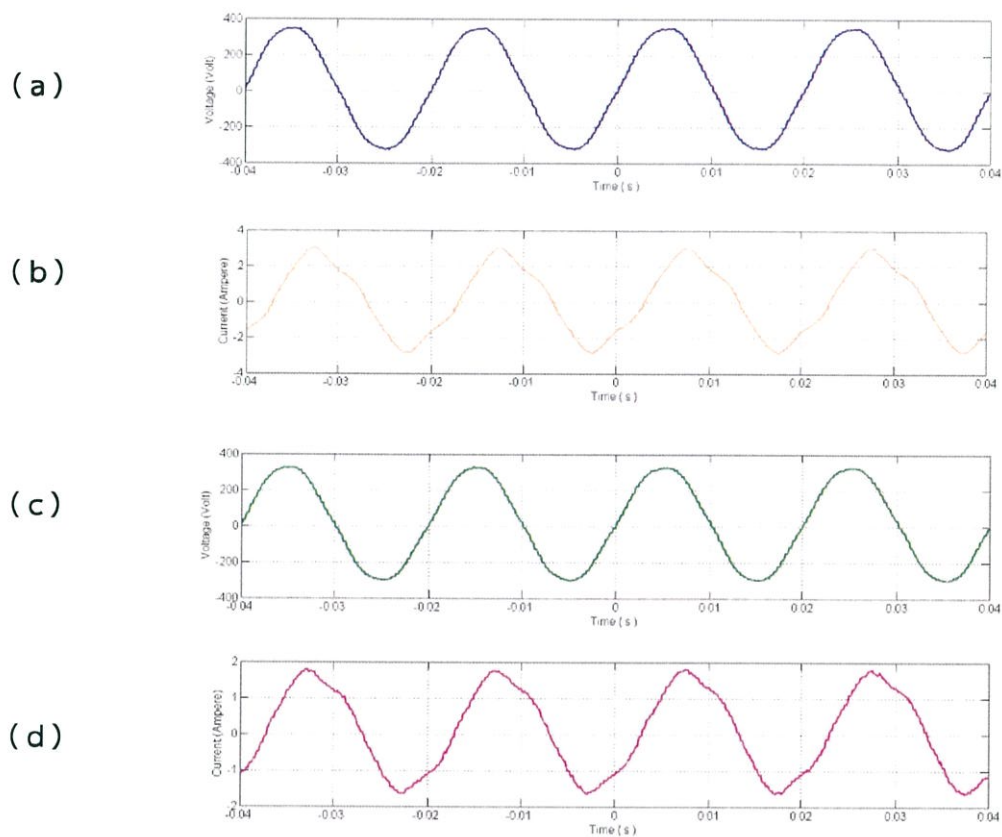
#### 4.2.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%



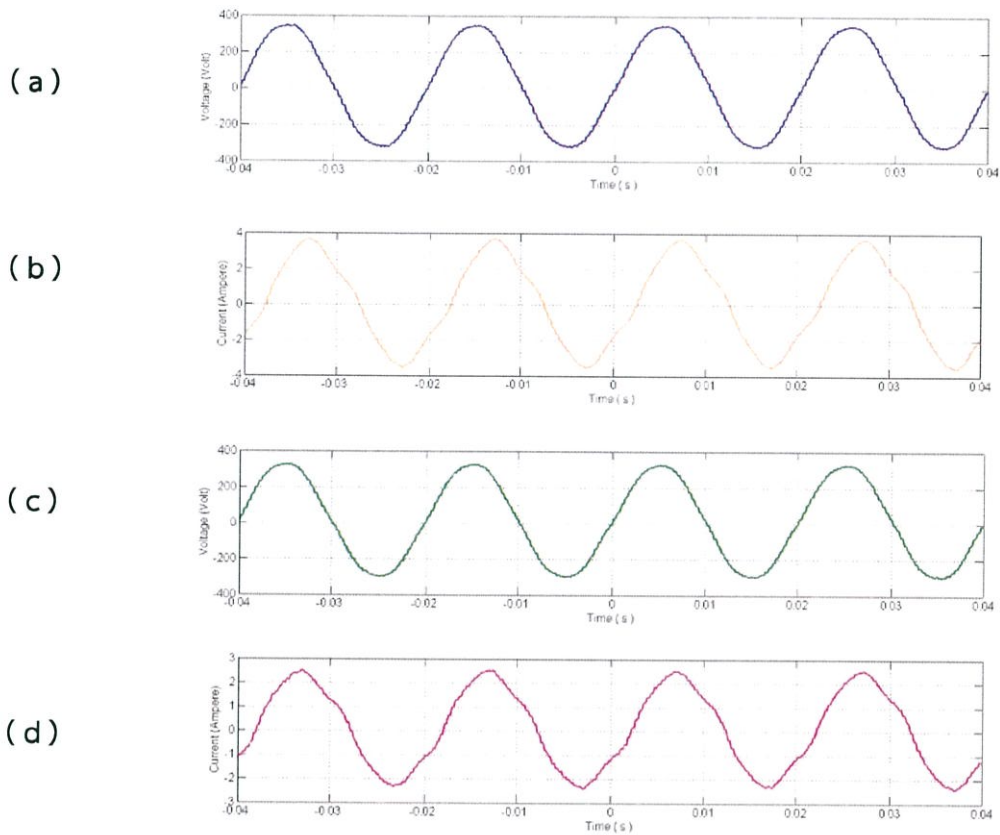
**รูปที่ 4.52** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ ( d ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.53** (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A (b) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A (c) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ (d) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



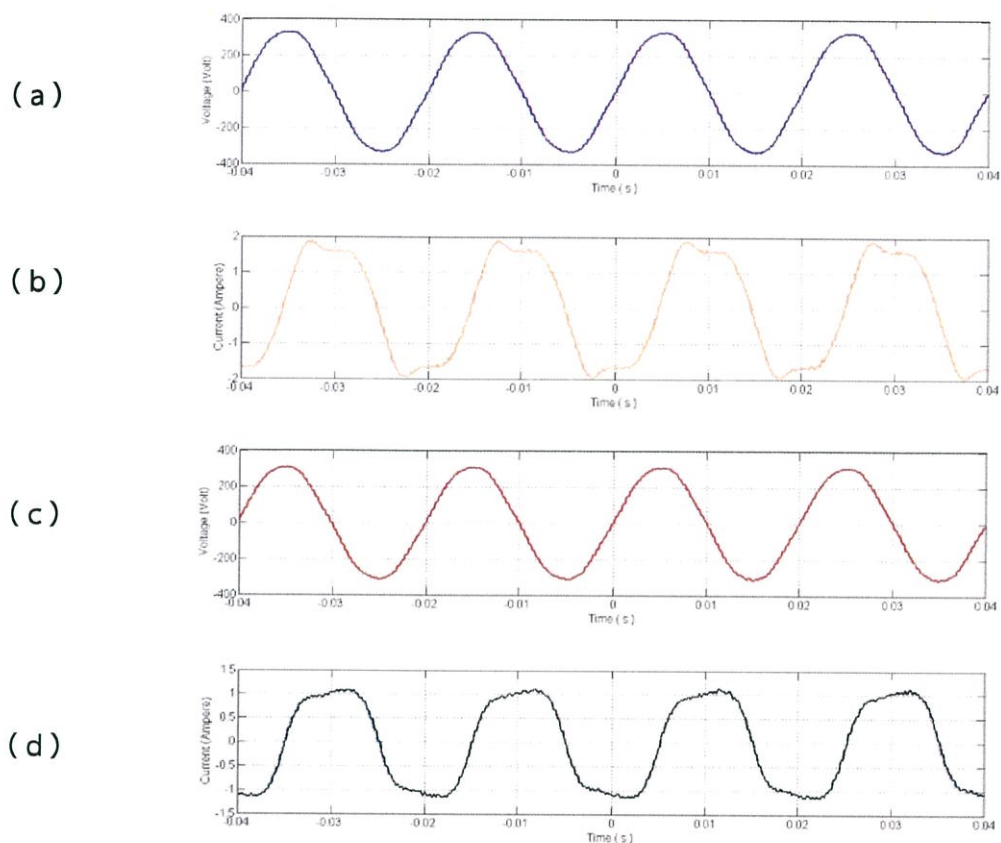
**รูปที่ 4.54** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ ( d ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส B

**ตารางที่ 4.5** ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	
0	236.9	220	220	1.498	0.905	1.025	1497
50	236.9	220	221	1.940	1.170	1.130	1451
100	236.1	219.8	218.9	2.447	1.686	1.575	1400

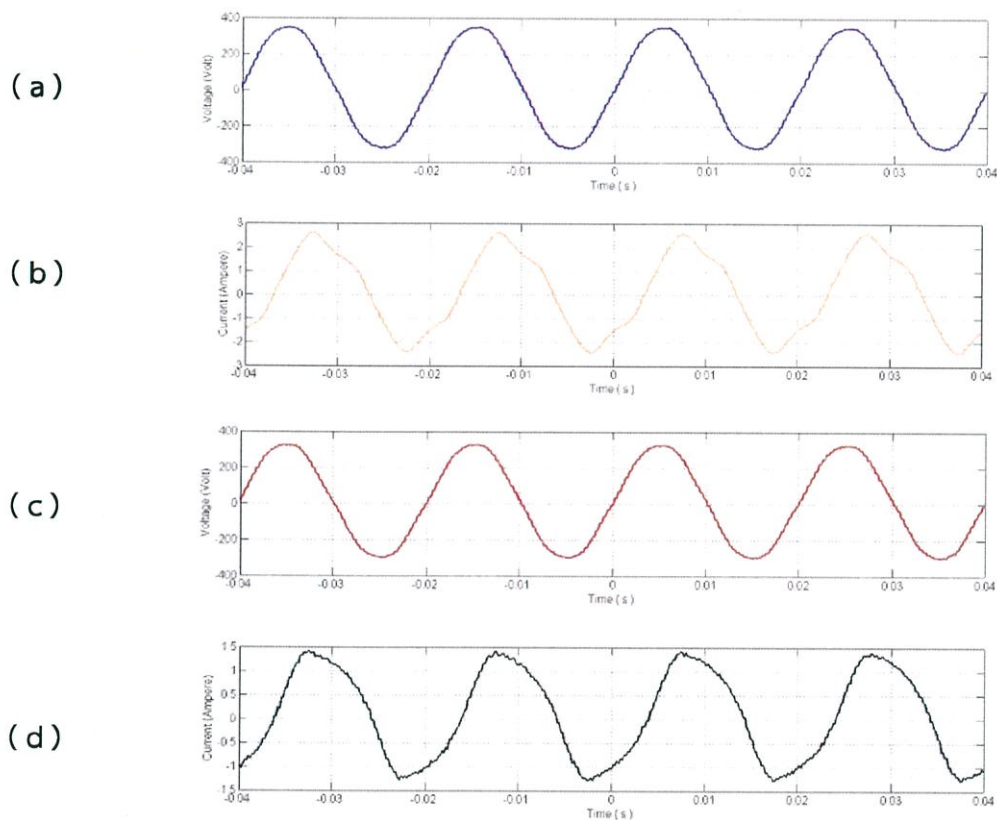
## 4.2.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 0%



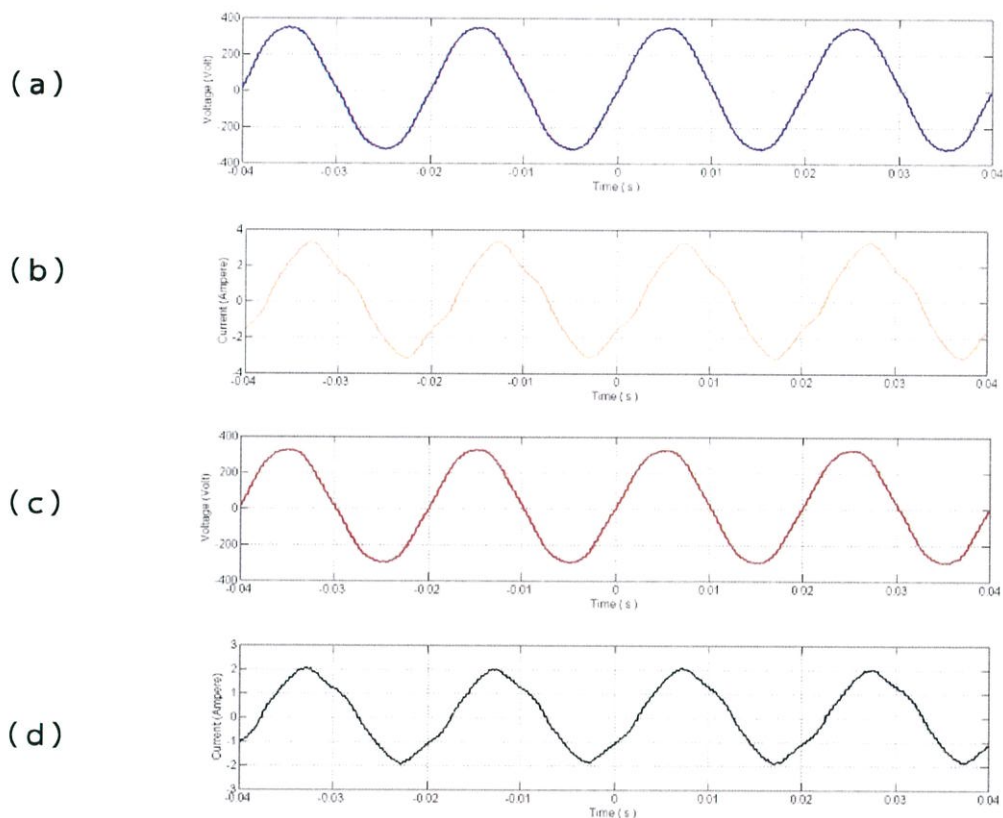
รูปที่ 4.55 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A (b) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A (c) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ (d) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.56** ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ ( d ) สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



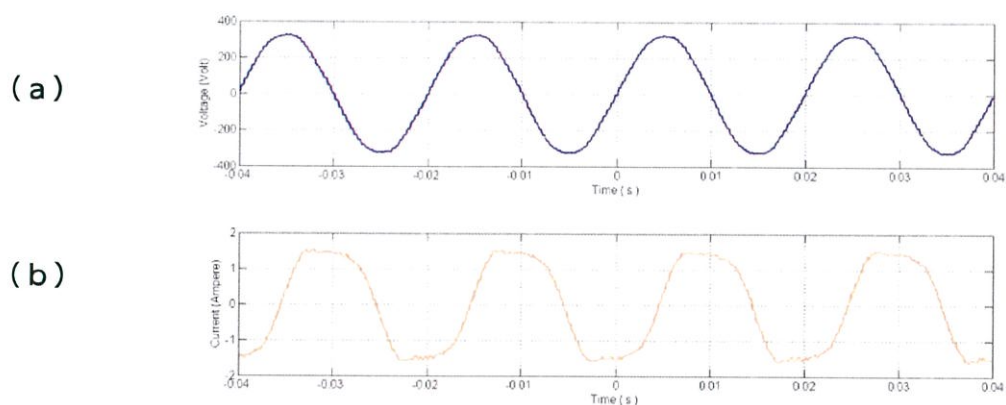
รูปที่ 4.57 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A ( b ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A ( c ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส C และ ( d ) สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เฟส C

ตารางที่ 4.6 ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	
0	236.1	237.4	220	1.384	1.376	0.893	1499
50	237.4	237.6	219.7	1.701	1.734	0.952	1453
100	237	237.3	219.3	2.148	2.224	1.324	1405

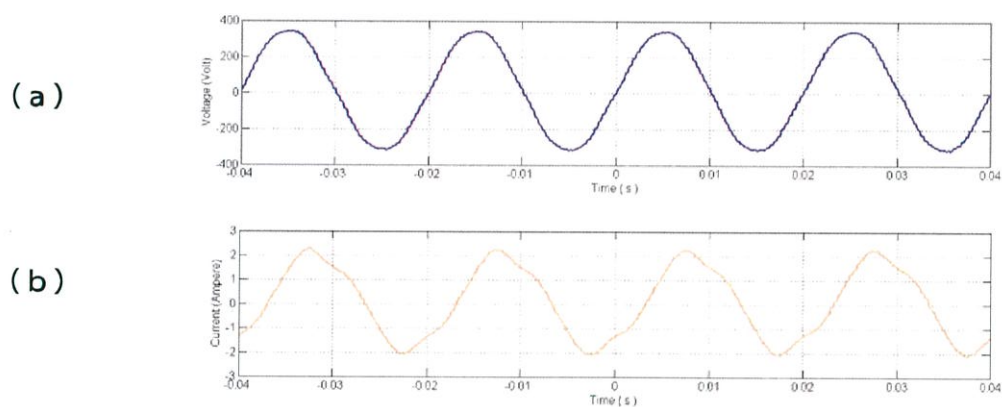
### 4.2.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%



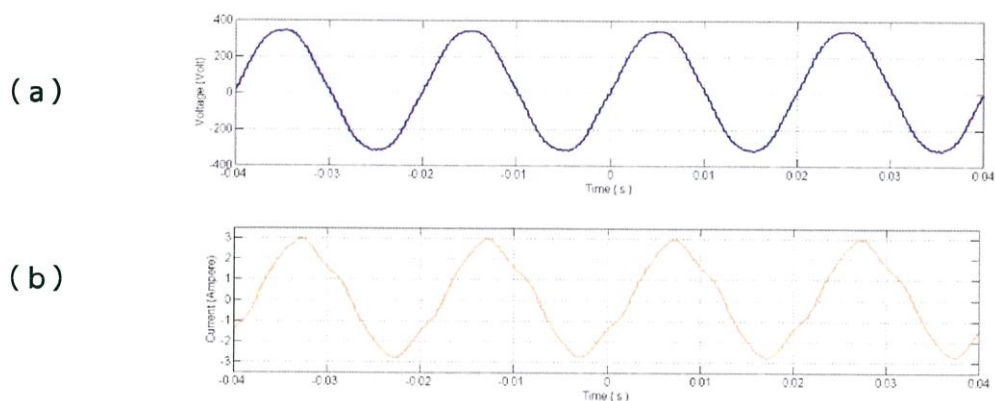
รูปที่ 4.58 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ (b) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



รูปที่ 4.59 (a) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ (b) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.60 ( a ) สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ ( b ) สัญญาณกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เฟส A

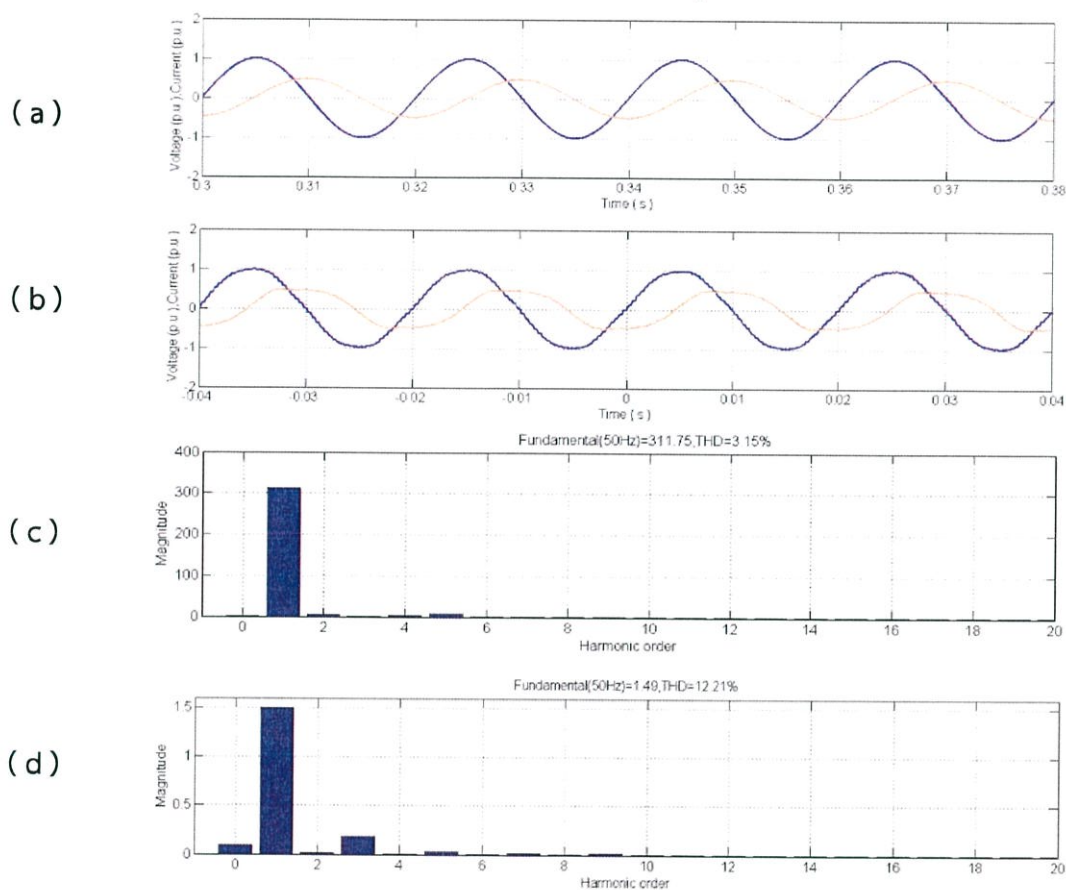
ตารางที่ 4.7 ผลที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส

%Load	Voltage ( Volt )			Current ( Ampere )			Speed ( rpm )
	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	
0	231.2	231.6	231.7	1.182	1.142	1.259	1498
50	230.5	231.1	231.0	1.485	1.441	1.451	1452
100	230.4	230.9	230.8	1.936	1.891	1.888	1406

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลอง และการทดสอบ ( LAB TEST )

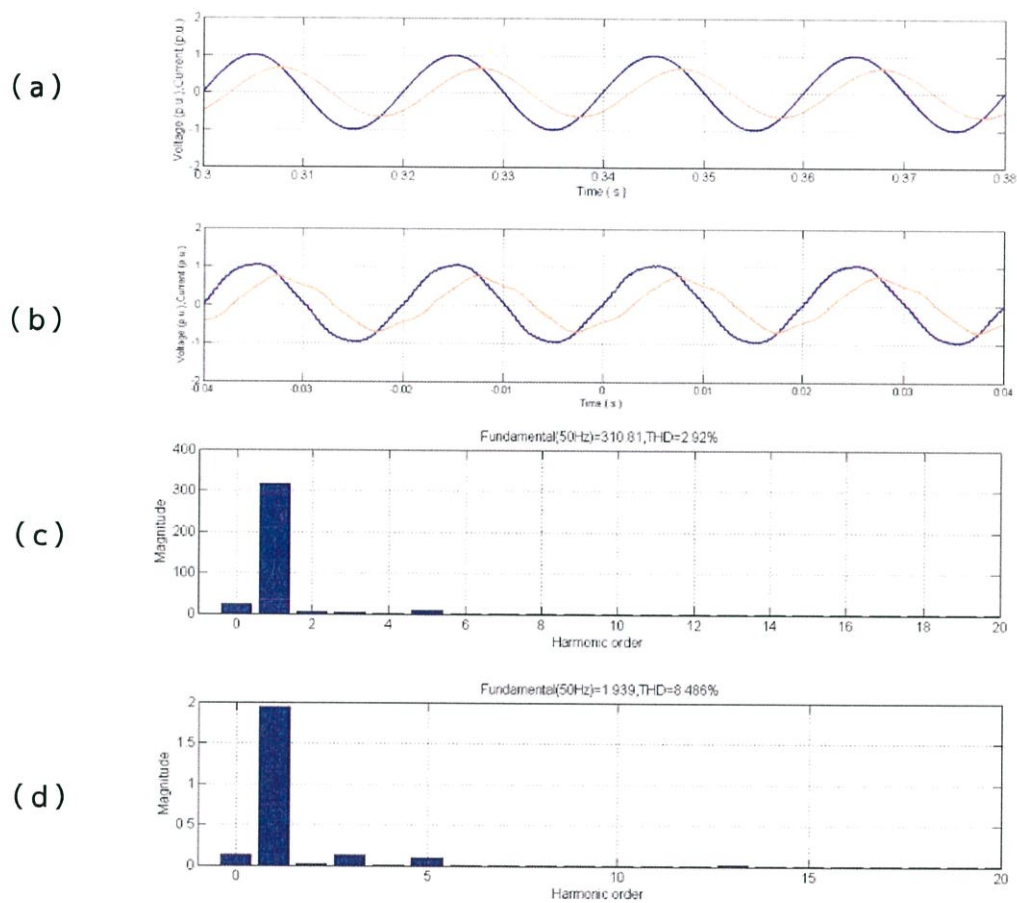
#### 4.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 0%



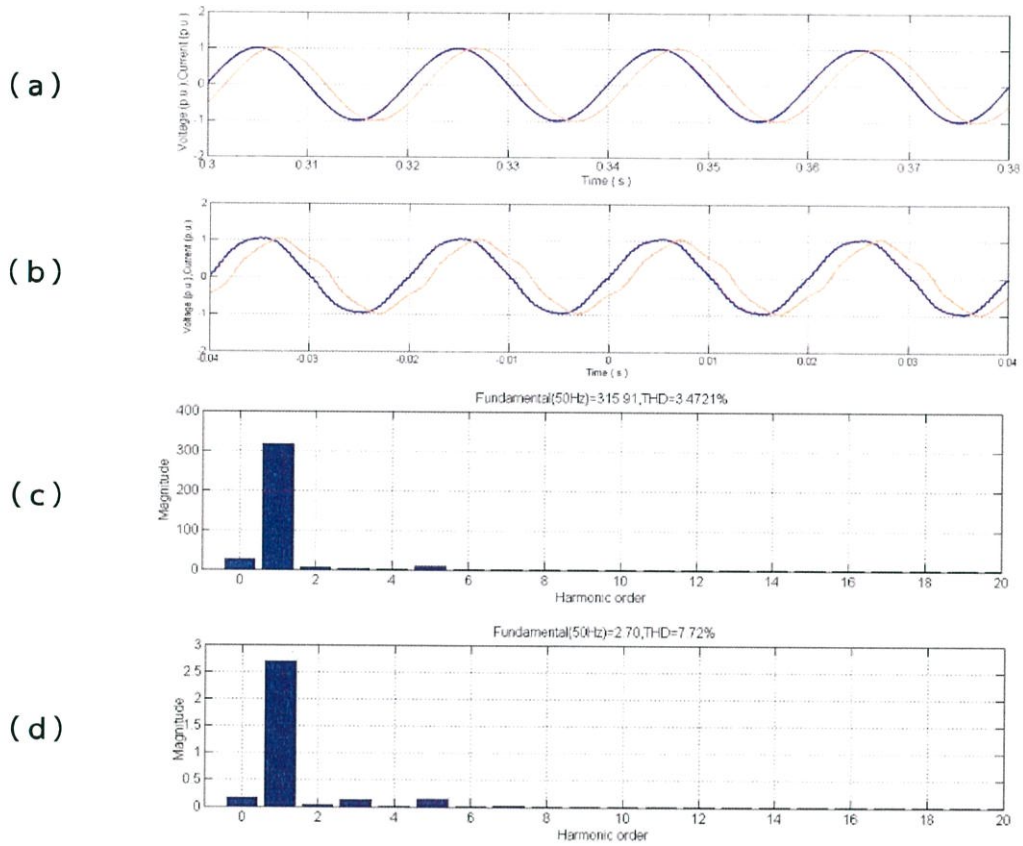
รูปที่ 4.61 ( a ) สัญญาณจากการจำลองเฟส A ( b ) สัญญาณจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A  
 ( c ) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A และ  
 ( d ) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A

### สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมมูล ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.62** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

### สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ที่โหลด 100%



**รูปที่ 4.63** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A  
(c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ  
(d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

จากหัวข้อ 4.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล จะแสดงค่า %THD ดังต่อไปนี้

กราฟที่ได้จากการทดสอบ ( LAB TEST ) จะมีลักษณะคล้ายกับกราฟที่ได้จากการจำลองเนื่องจากพิจารณาจากค่า p.u. ในมอเตอร์ที่พิกัดต่างกัน แต่กราฟที่ได้จากการทดสอบ ( LAB TEST ) จะมีความผิดเพี้ยน เนื่องจากมอเตอร์ที่ผลิตมาจากโรงงานมีความไม่สมบูรณ์ตามค่าใน Name Plate และในแหล่งจ่ายไฟฟ้าในห้องทดสอบมีความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่าง ๆ ดังนี้

ขณะที่โหลด 0%                      จะมีค่า  $\%THD_v = 3.15\%$  และ  $\%THD_i = 12.21\%$

ขณะที่โหลด 50%                      จะมีค่า  $\%THD_v = 2.92\%$  และ  $\%THD_i = 8.48\%$

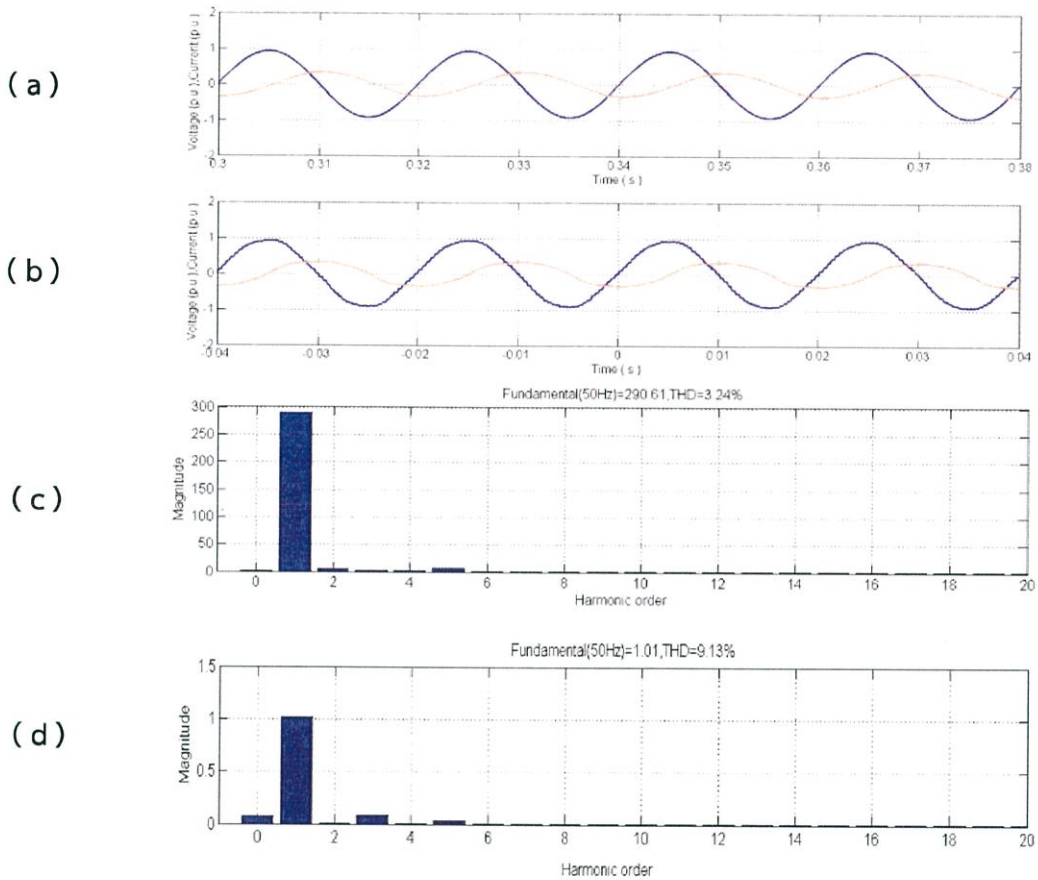
ขณะที่โหลด 100%                      จะมีค่า  $\%THD_v = 3.47\%$  และ  $\%THD_i = 7.72\%$

จะเห็นได้ว่าการทดสอบกับมอเตอร์จะไม่ได้ค่าที่เหมือนกับค่าที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากจะเกิดจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง และคุณภาพไฟฟ้าที่นำมาจ่ายให้กับมอเตอร์

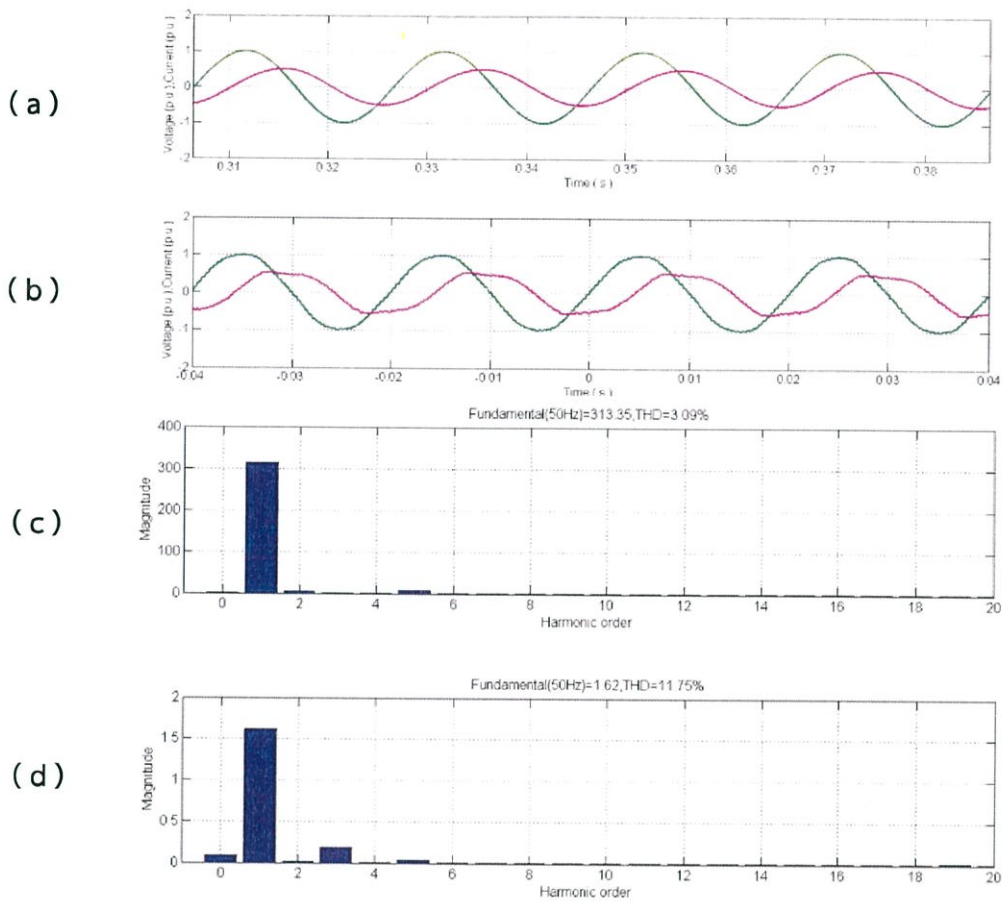
### 4.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

#### 4.3.2.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5%

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติที่เฟส A ที่โหลด 0%

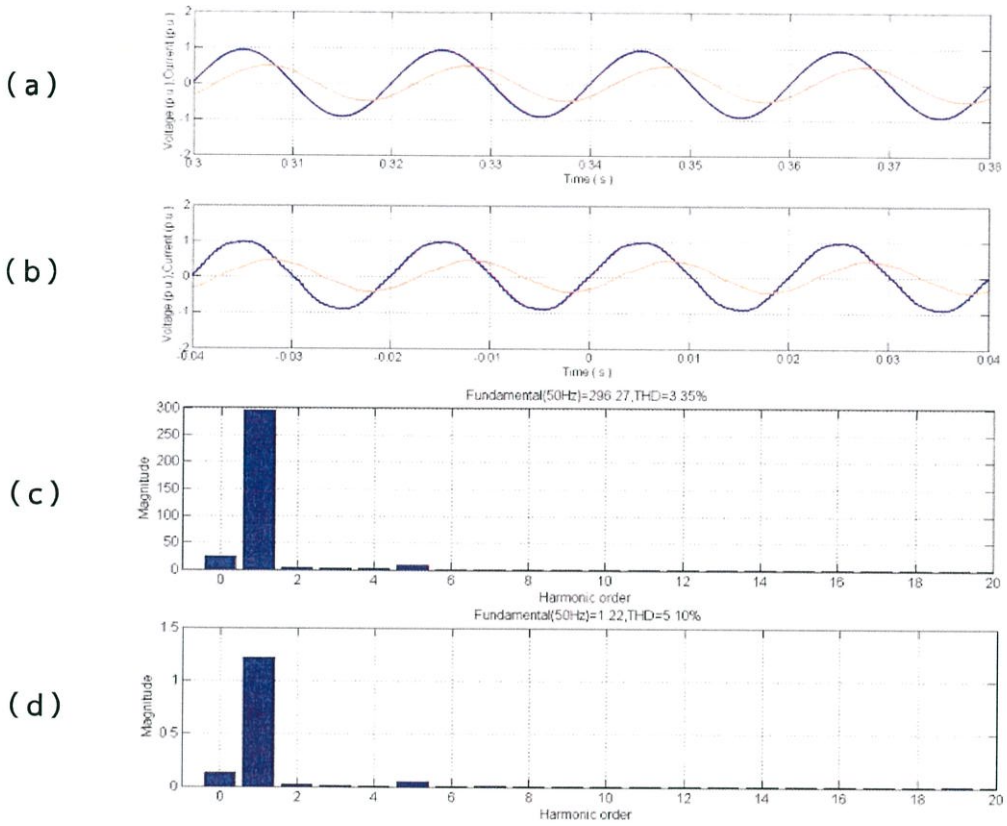


**รูปที่ 4.64** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

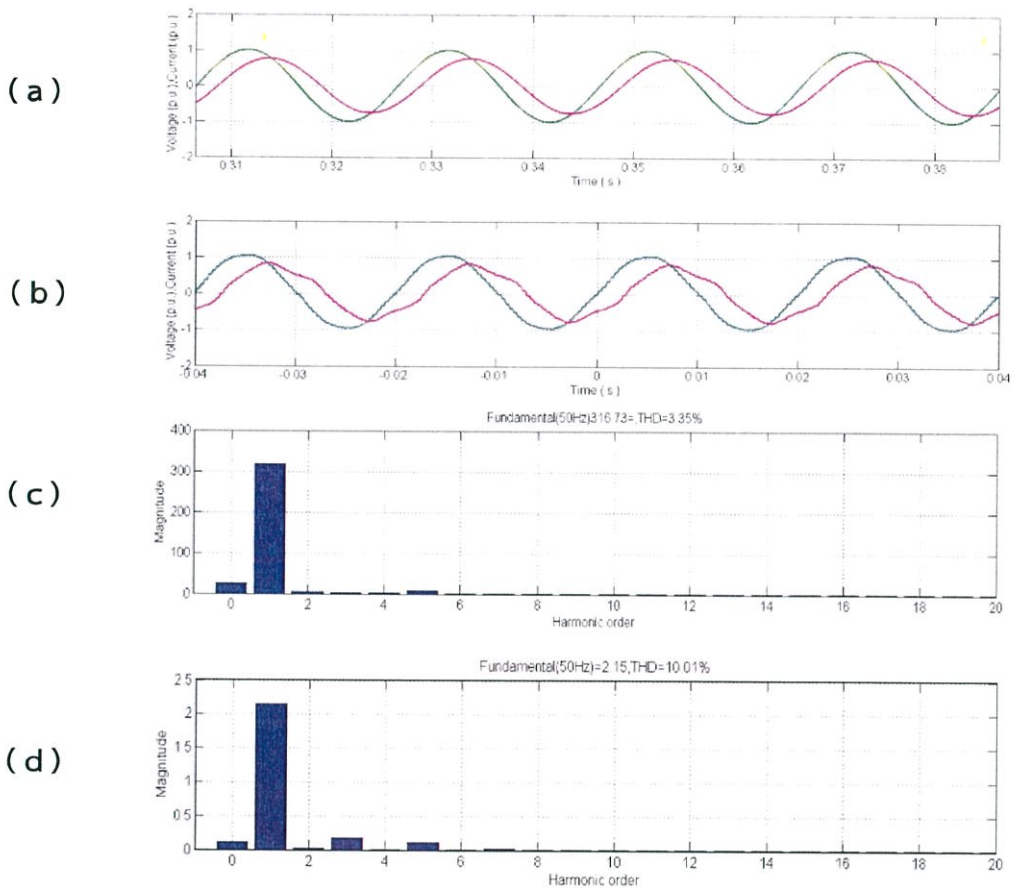


**รูปที่ 4.65** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%

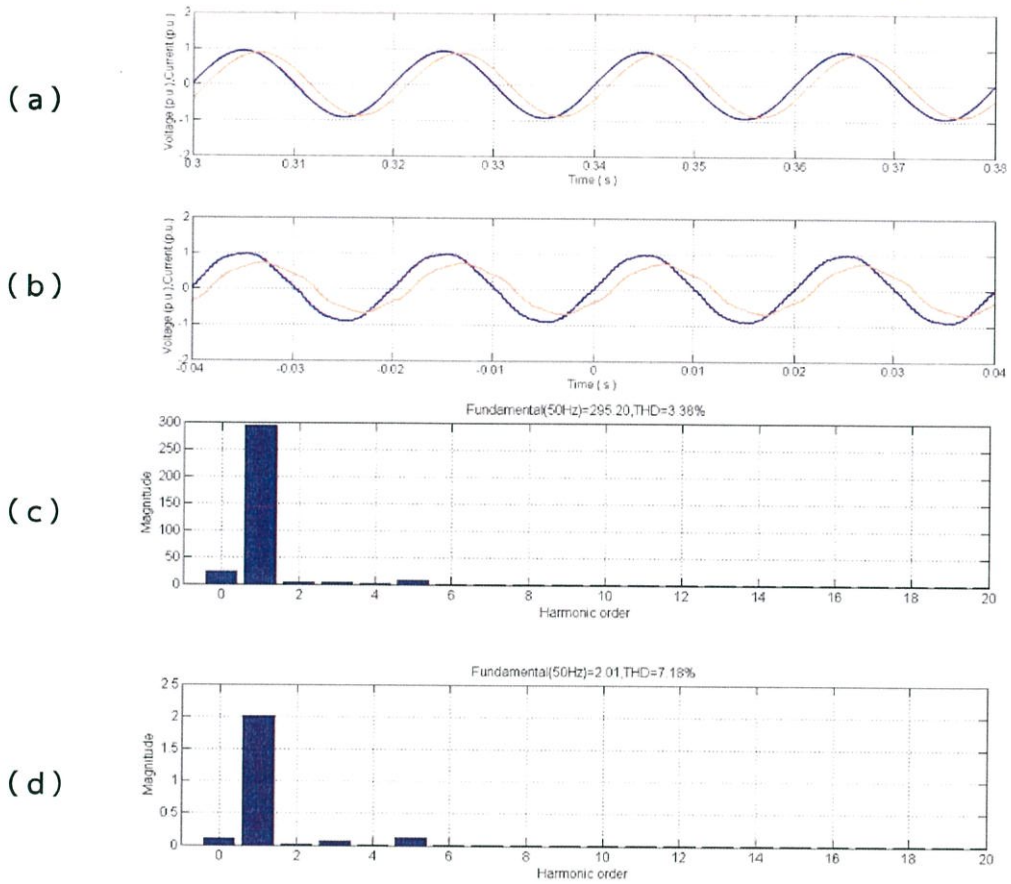


รูปที่ 4.66 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

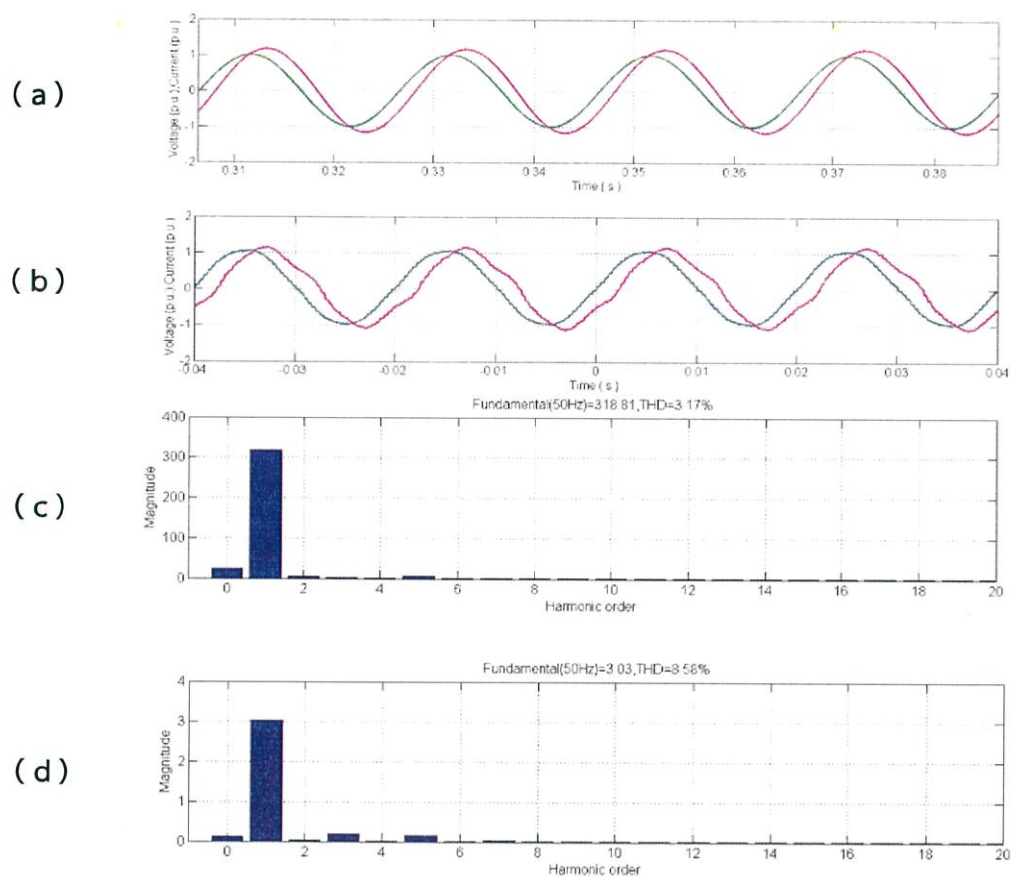


**รูปที่ 4.67** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B  
 (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ  
 (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



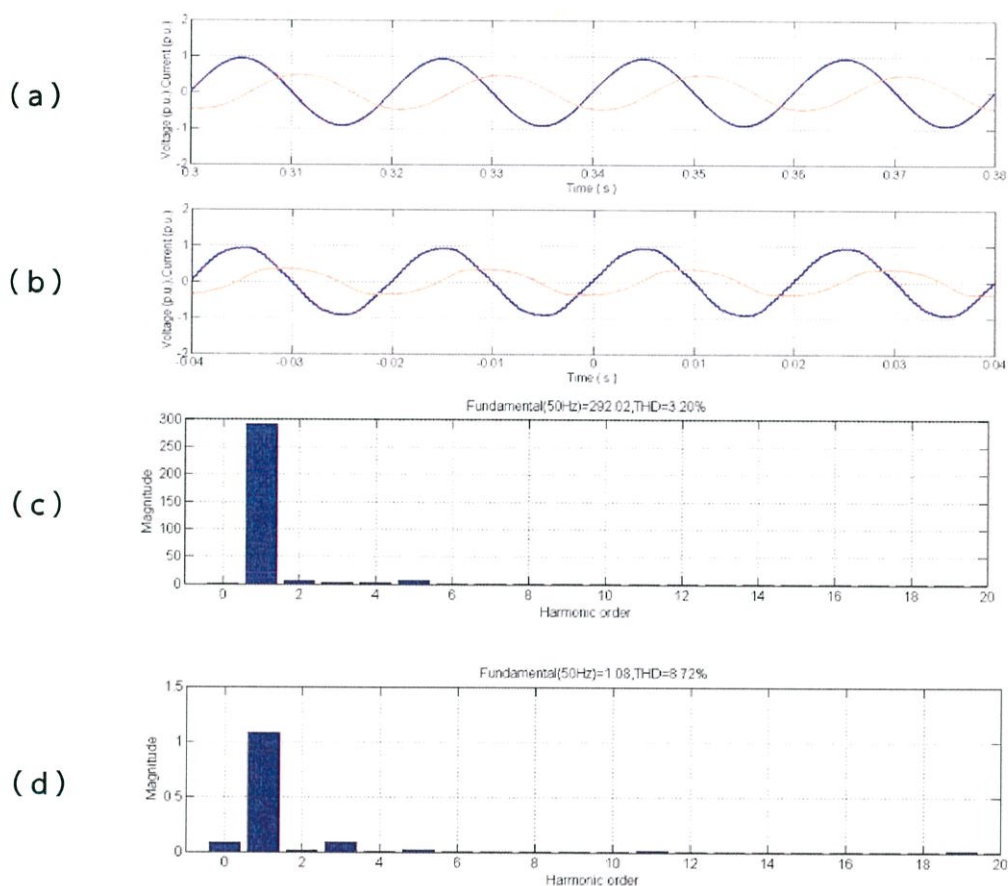
**รูปที่ 4.68** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A



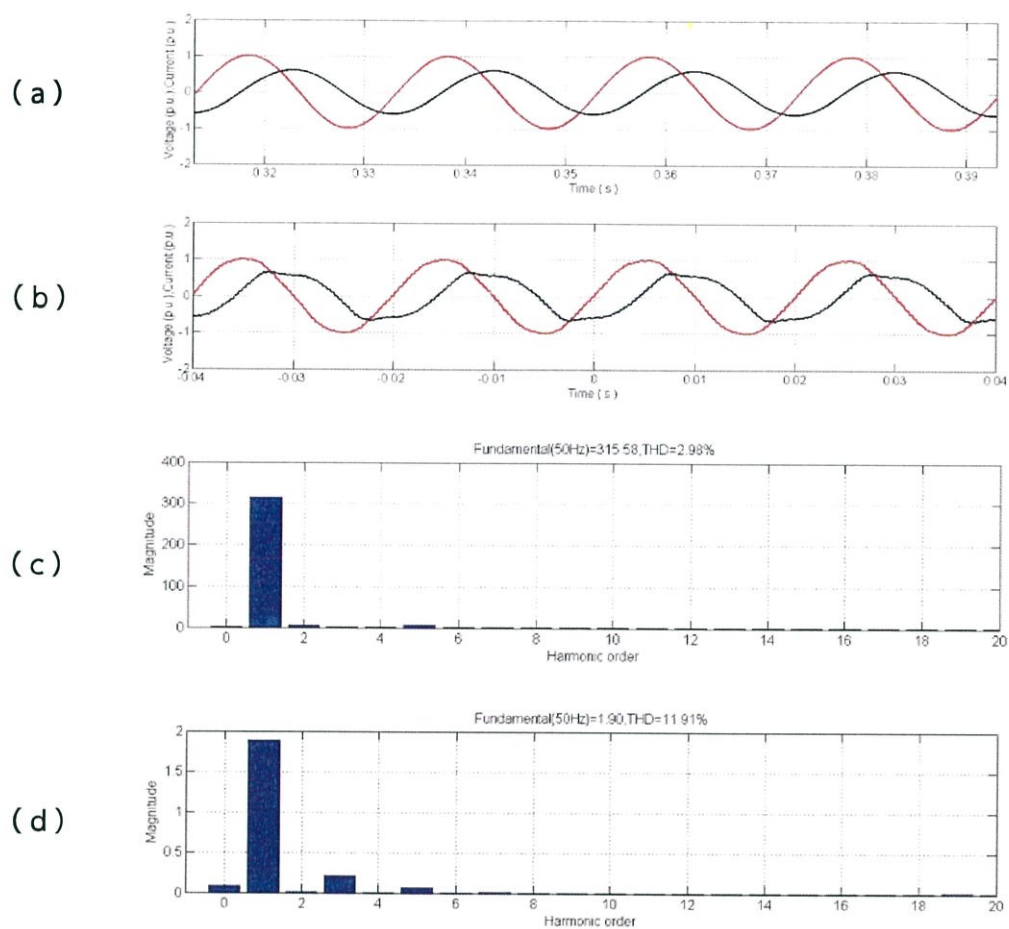
**รูปที่ 4.69** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B  
 (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ  
 (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

### 4.3.2.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 0%

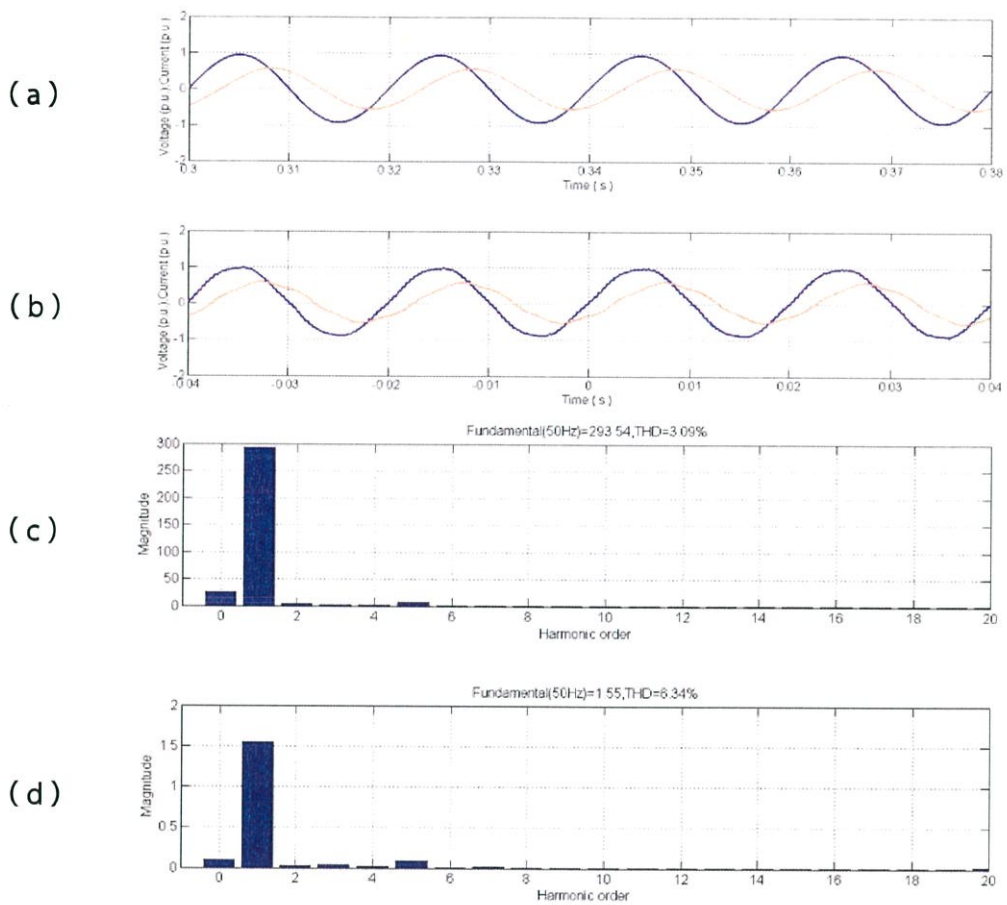


รูปที่ 4.70 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

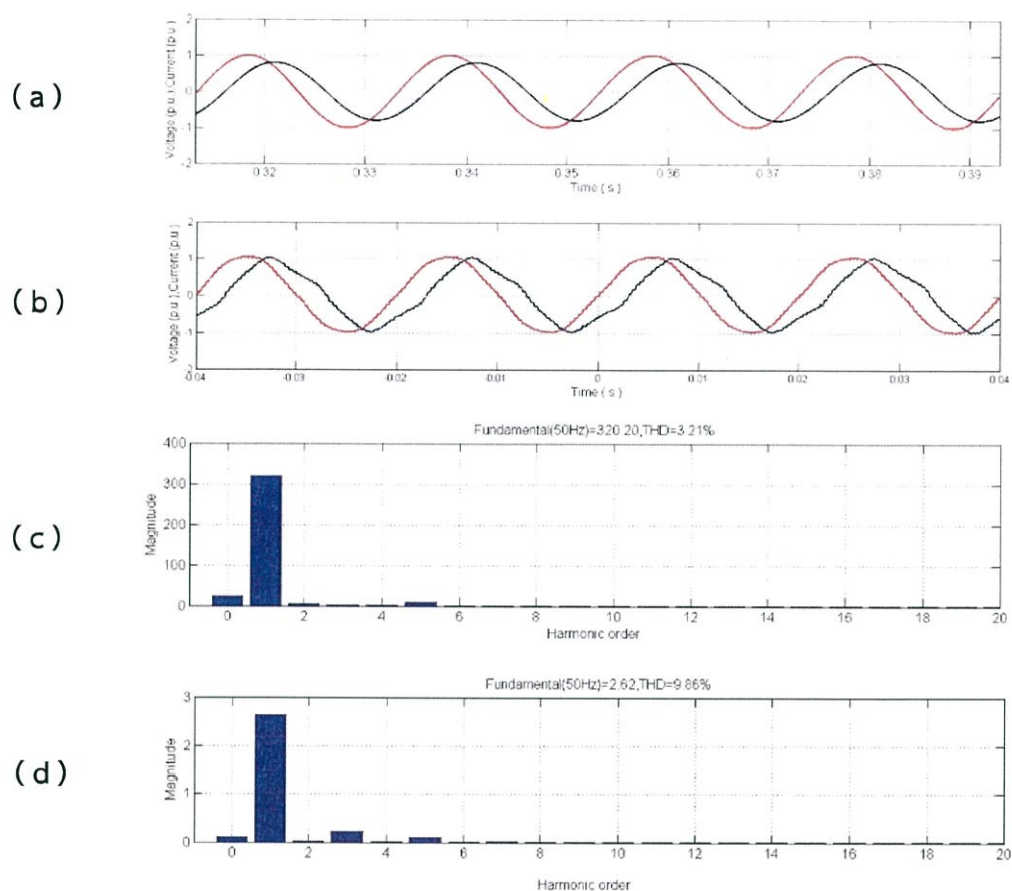


**รูปที่ 4.71** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%

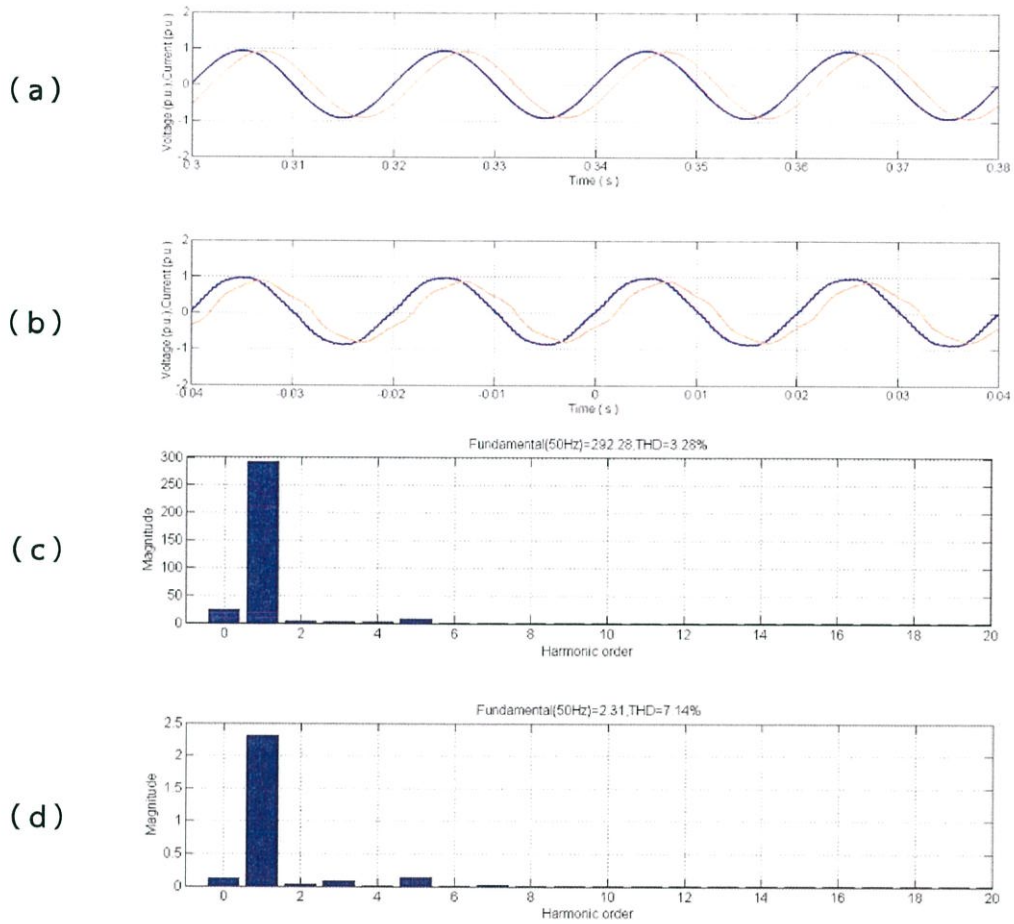


**รูปที่ 4.72** ( a ) สัญญาณจากการจำลองเฟส A ( b ) สัญญาณจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A  
 ( c ) ฮาร์มอนิกสั่นดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A และ  
 ( d ) ฮาร์มอนิกสั่นดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ ( LAB TEST ) เฟส A

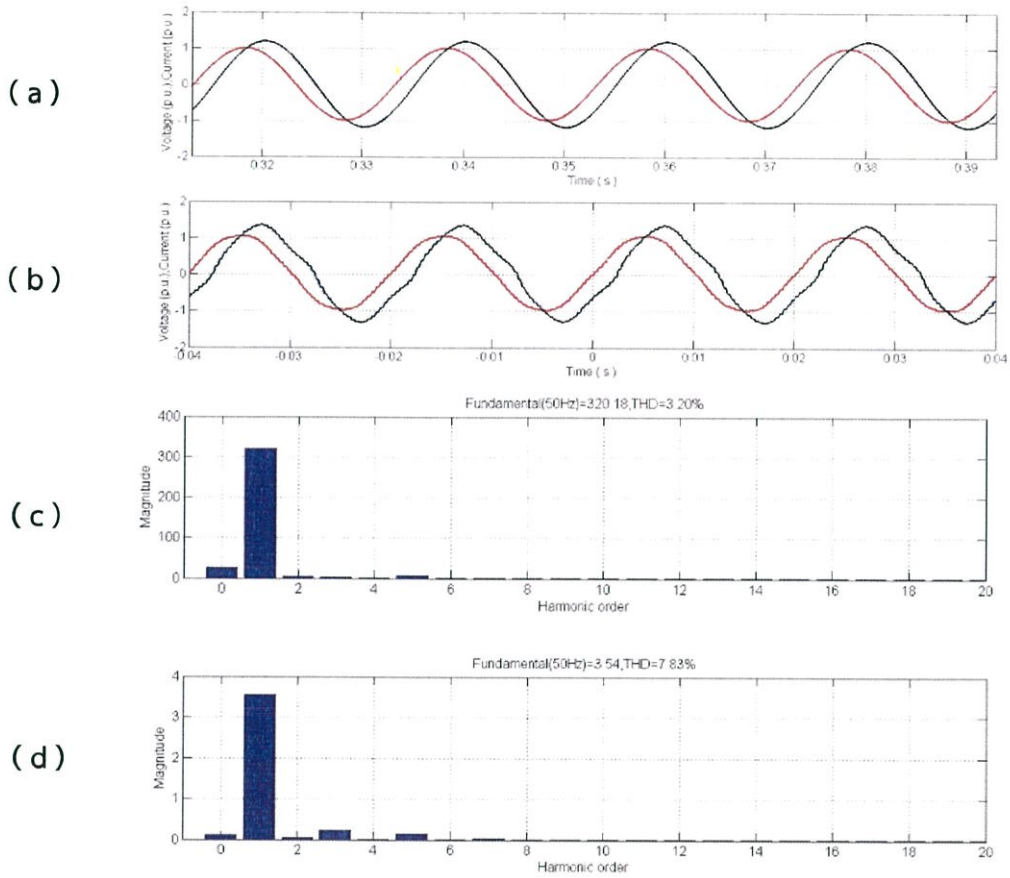


**รูปที่ 4.73** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



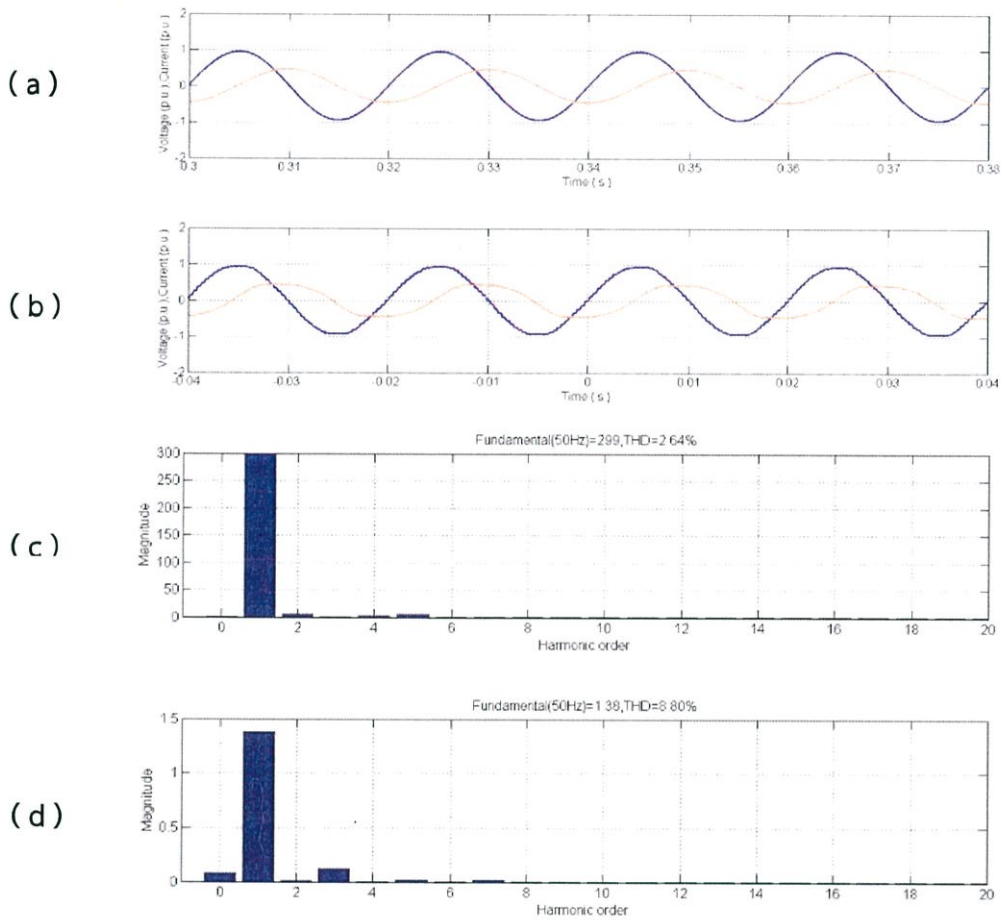
**รูปที่ 4.74** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A



รูปที่ 4.75 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์โมนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์โมนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

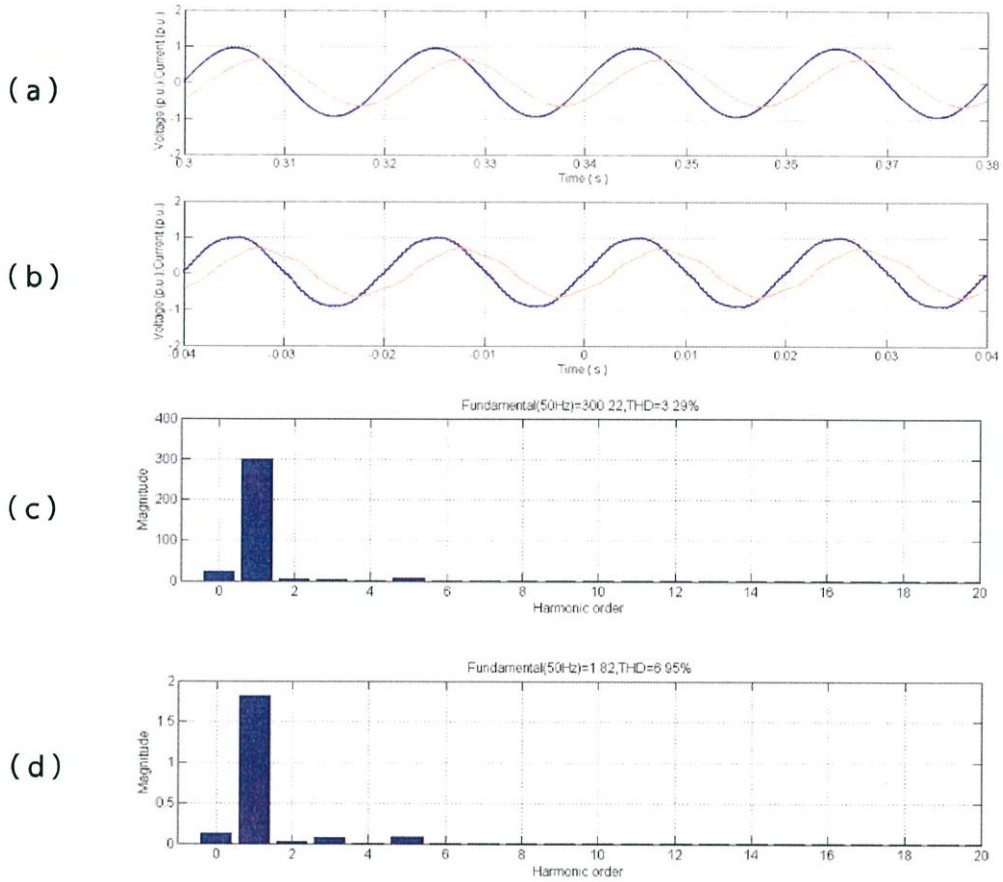
### 4.3.2.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%



รูปที่ 4.76 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

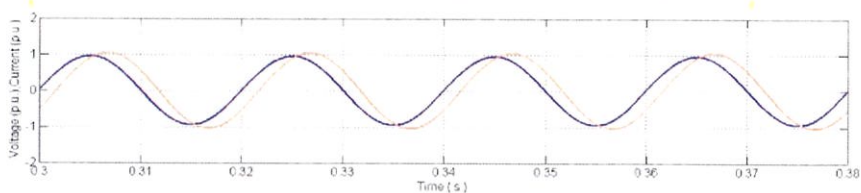
สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



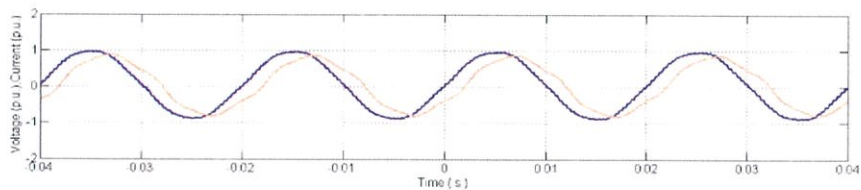
รูปที่ 4.77 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์โมนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์โมนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%

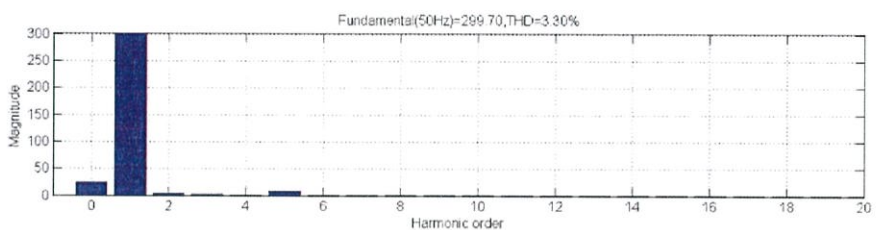
(a)



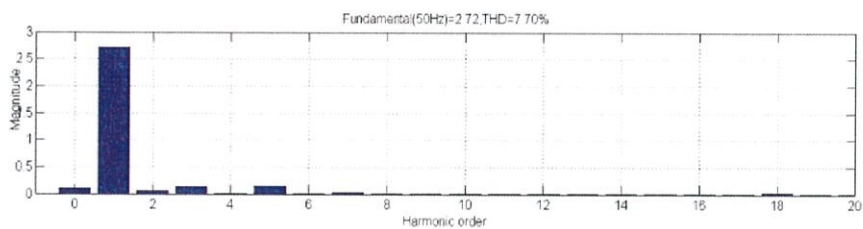
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 4.78 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

จากหัวข้อ 4.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ จะแสดงค่า %THD ดังต่อไปนี้

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.24\%$ และ $\%THD_i = 9.13\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.09\%$ และ $\%THD_i = 11.75\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.35\%$ และ $\%THD_i = 5.10\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.35\%$ และ $\%THD_i = 10.01\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.38\%$ และ $\%THD_i = 7.18\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.17\%$ และ $\%THD_i = 8.58\%$

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.20\%$ และ $\%THD_i = 8.72\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 2.98\%$ และ $\%THD_i = 11.92\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.09\%$ และ $\%THD_i = 6.34\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 3.21\%$ และ $\%THD_i = 9.86\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.28\%$ และ $\%THD_i = 7.14\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 3.20\%$ และ $\%THD_i = 7.83\%$

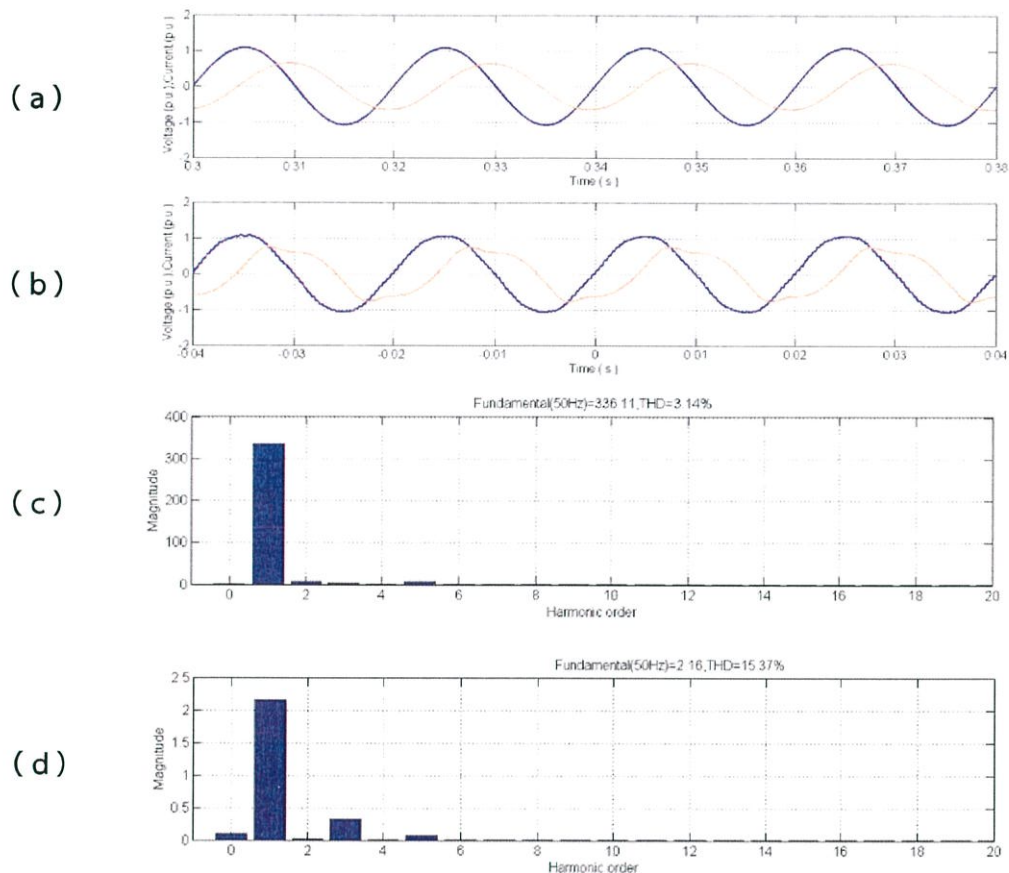
สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 2.64\%$ และ $\%THD_i = 8.80\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.29\%$ และ $\%THD_i = 6.95\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.30\%$ และ $\%THD_i = 7.70\%$

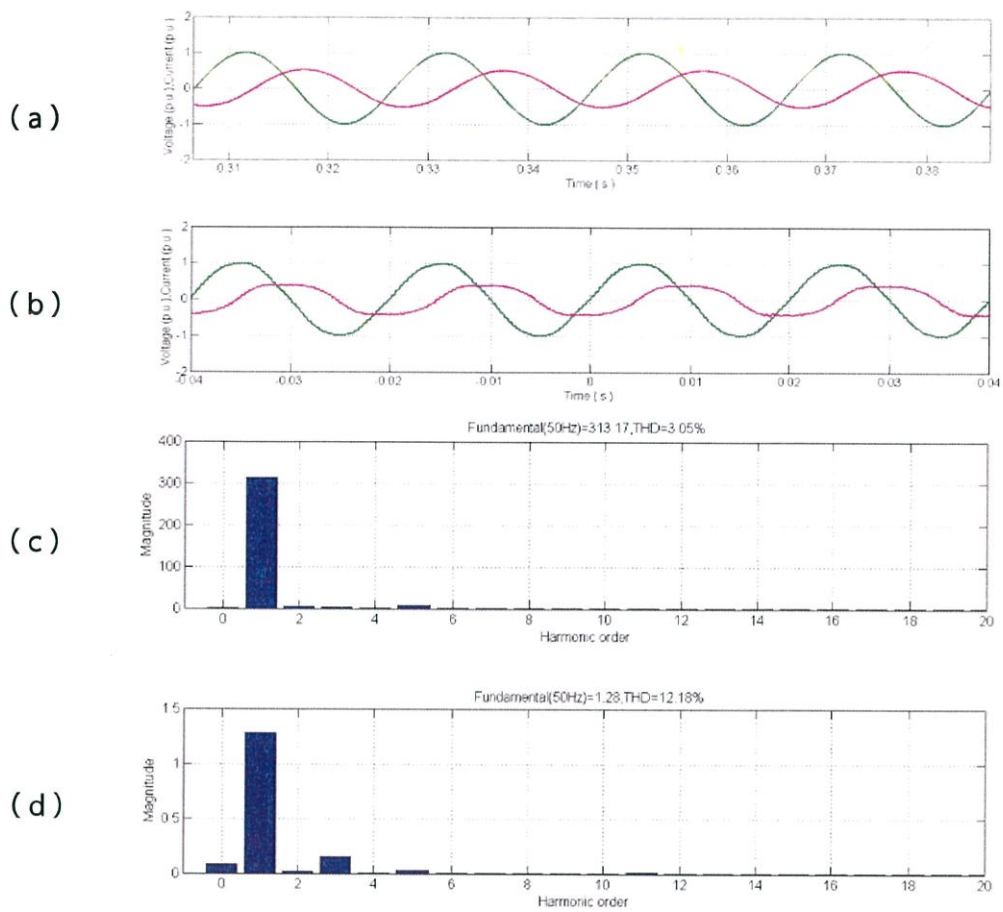
### 4.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

#### 4.3.3.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 0%

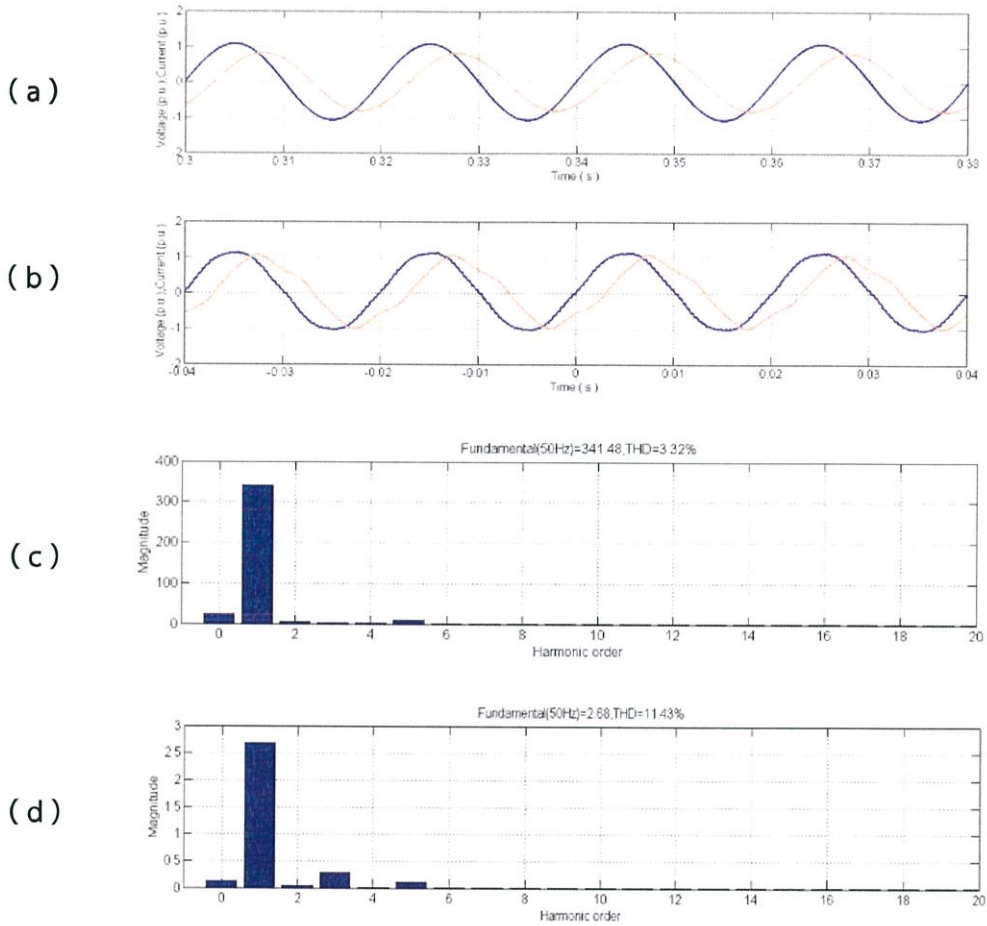


**รูปที่ 4.79** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

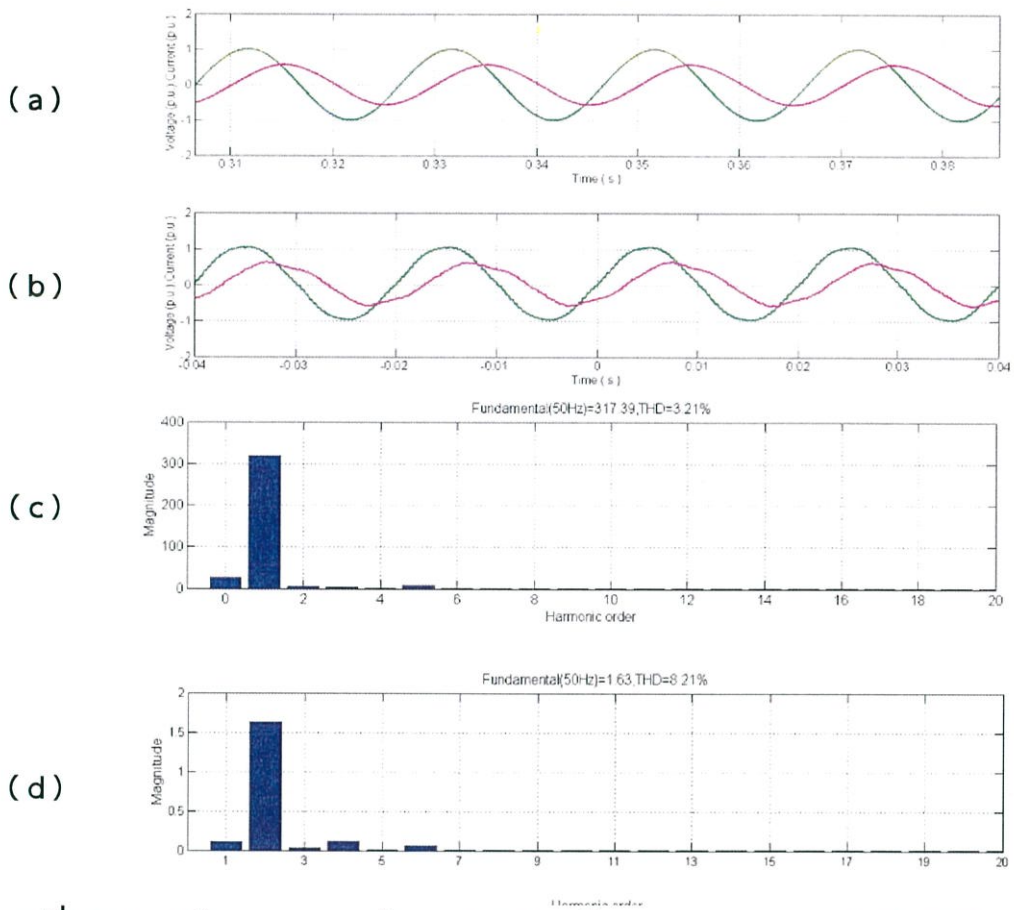


**รูปที่ 4.80** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 50%

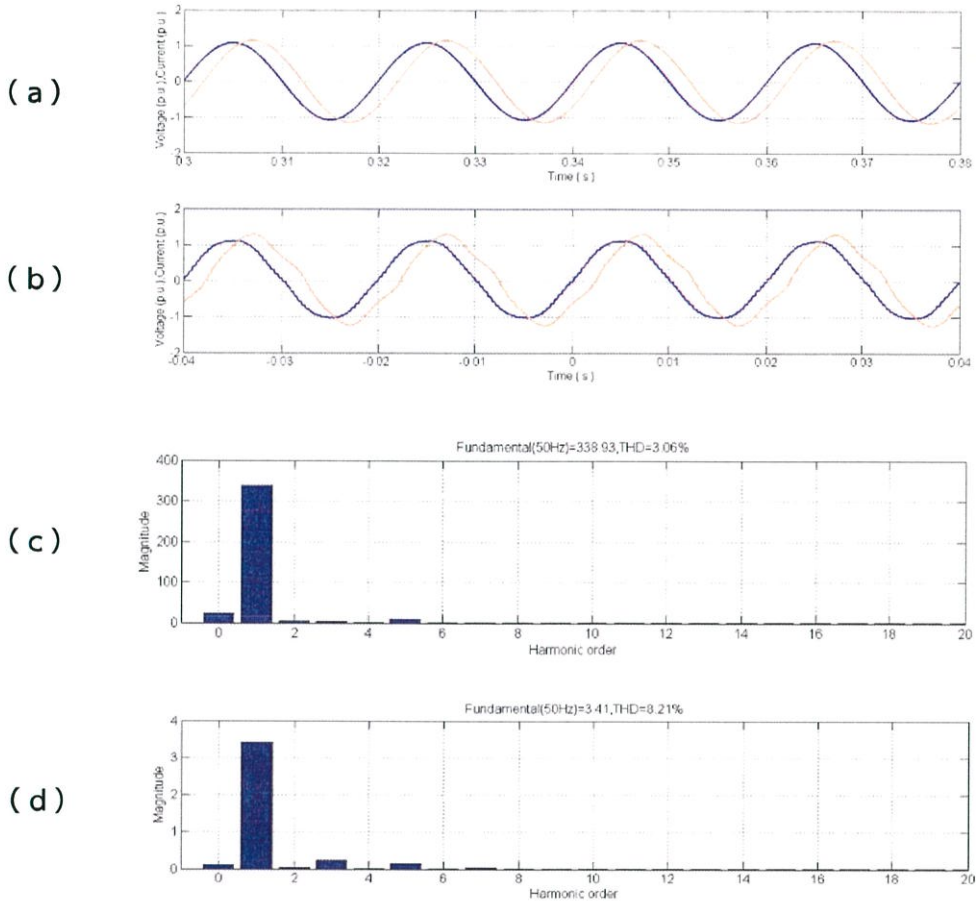


**รูปที่ 4.81** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

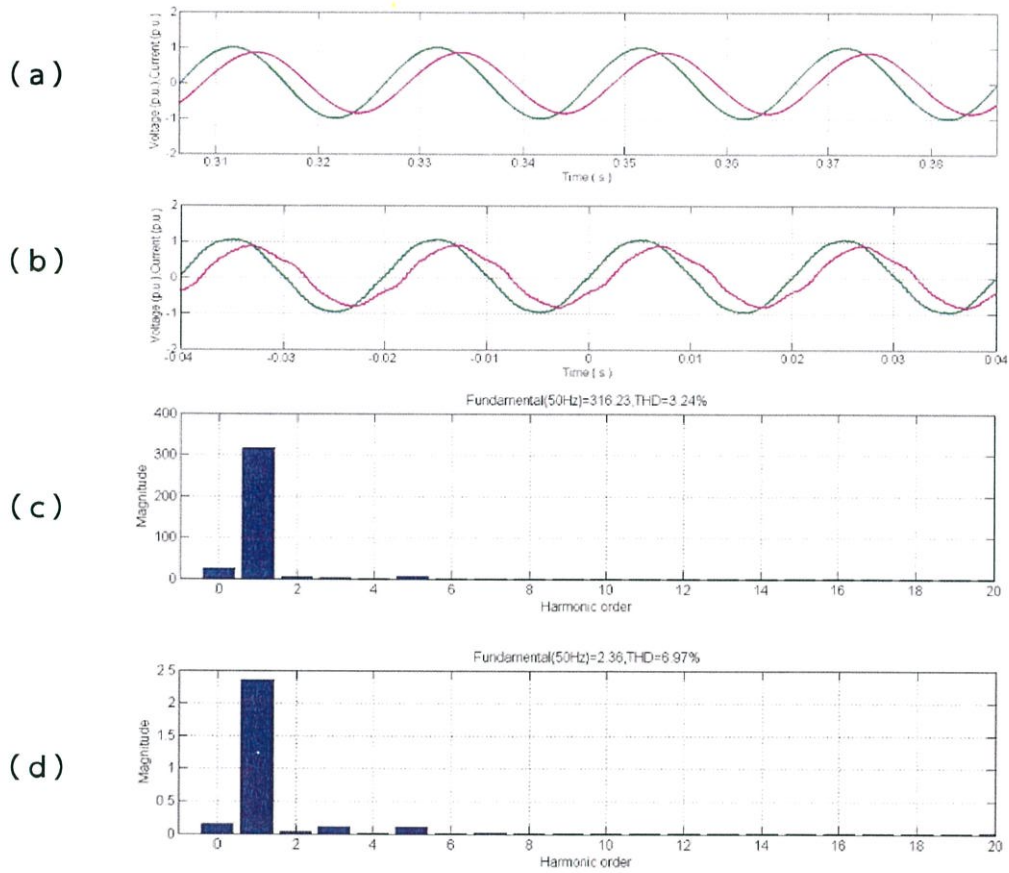


**รูปที่ 4.82** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%



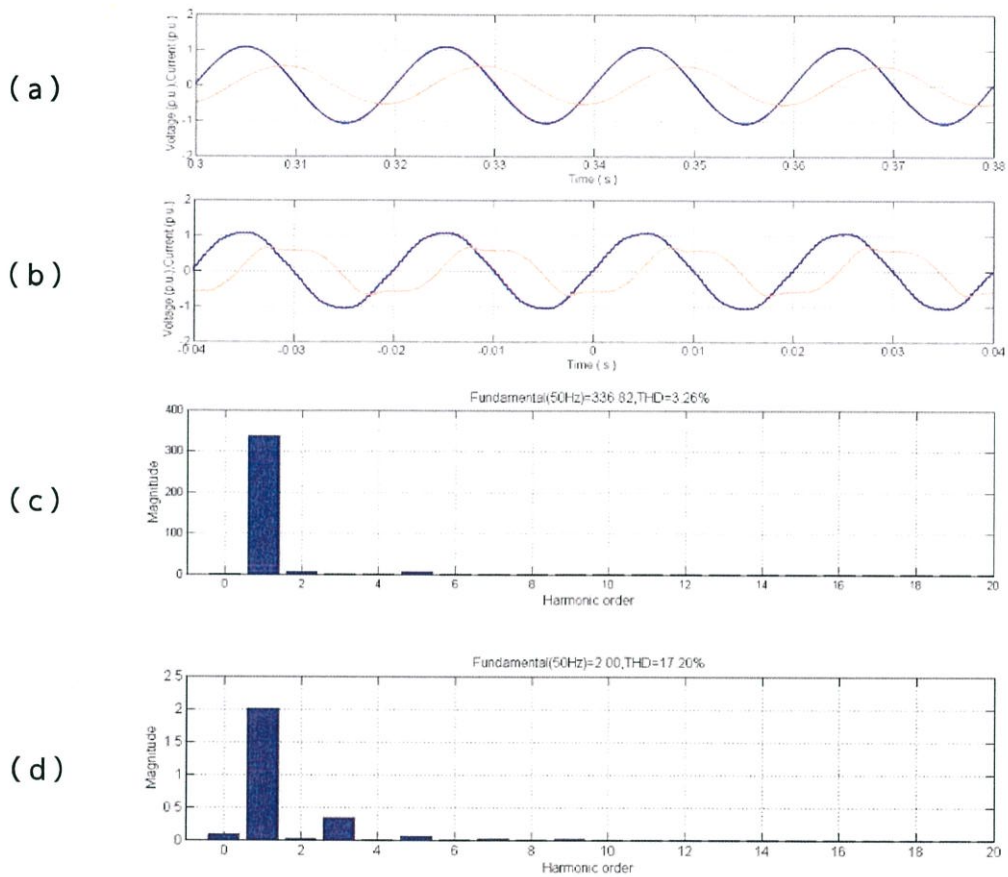
**รูปที่ 4.83** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A



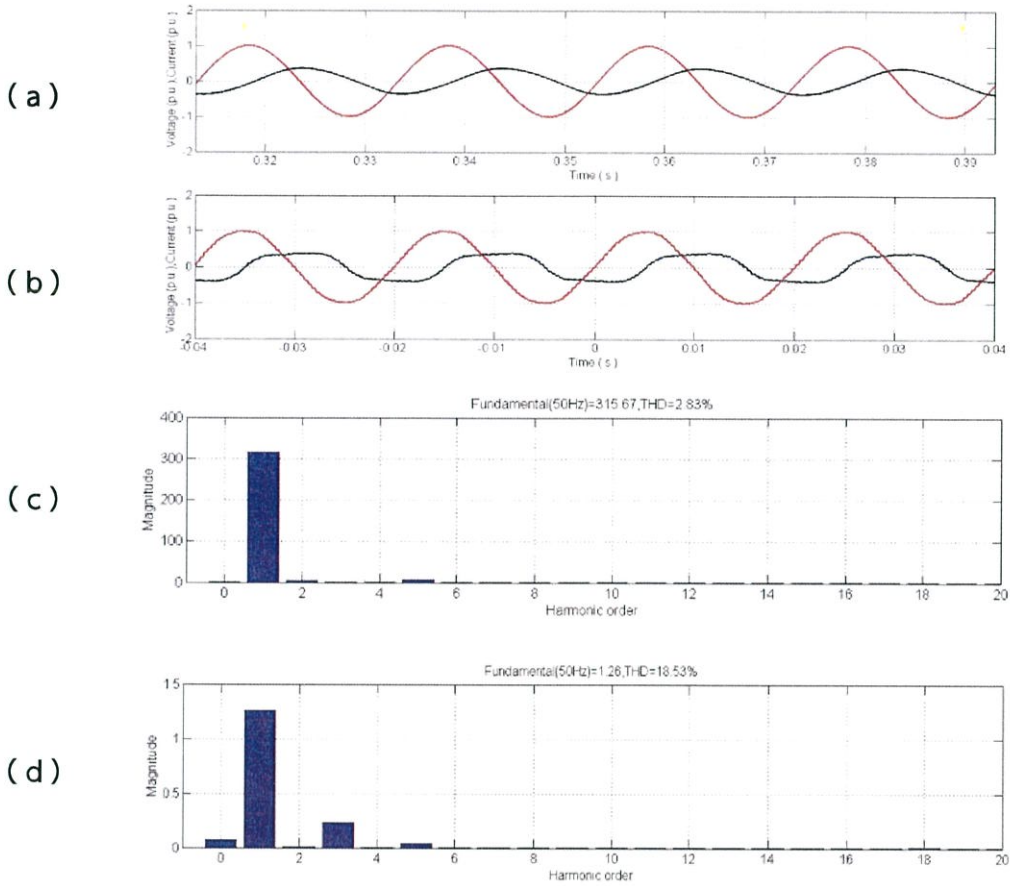
**รูปที่ 4.84** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส B (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส B

### 4.3.3.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 0%



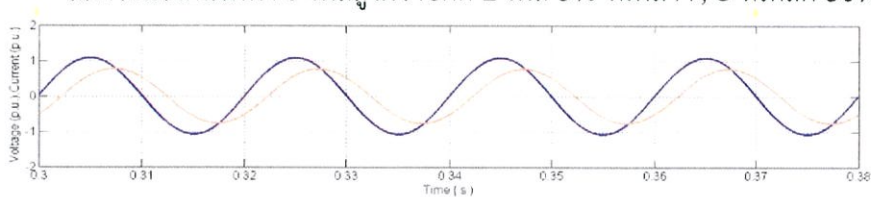
**รูปที่ 4.85** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A



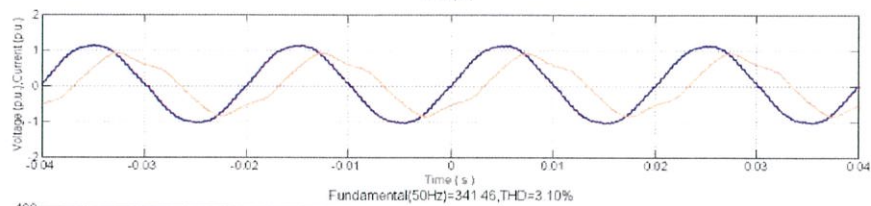
**รูปที่ 4.86** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 50%

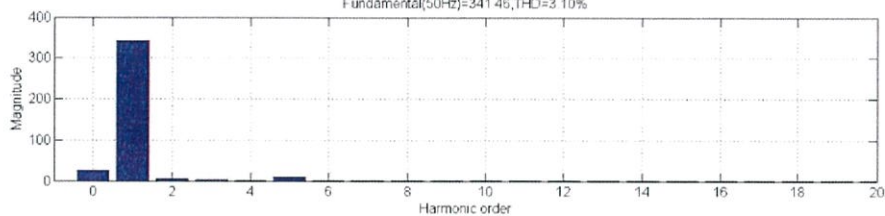
(a)



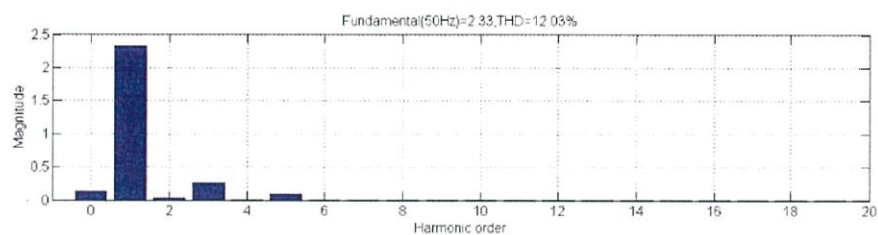
(b)



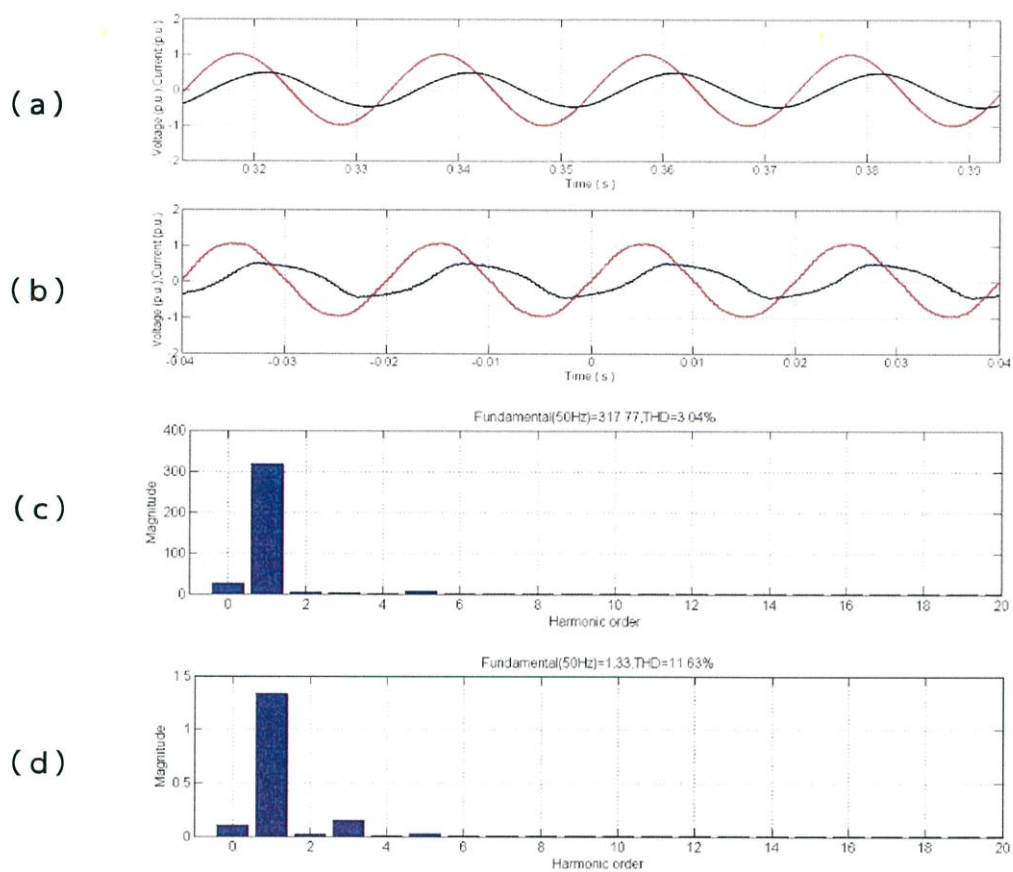
(c)



(d)

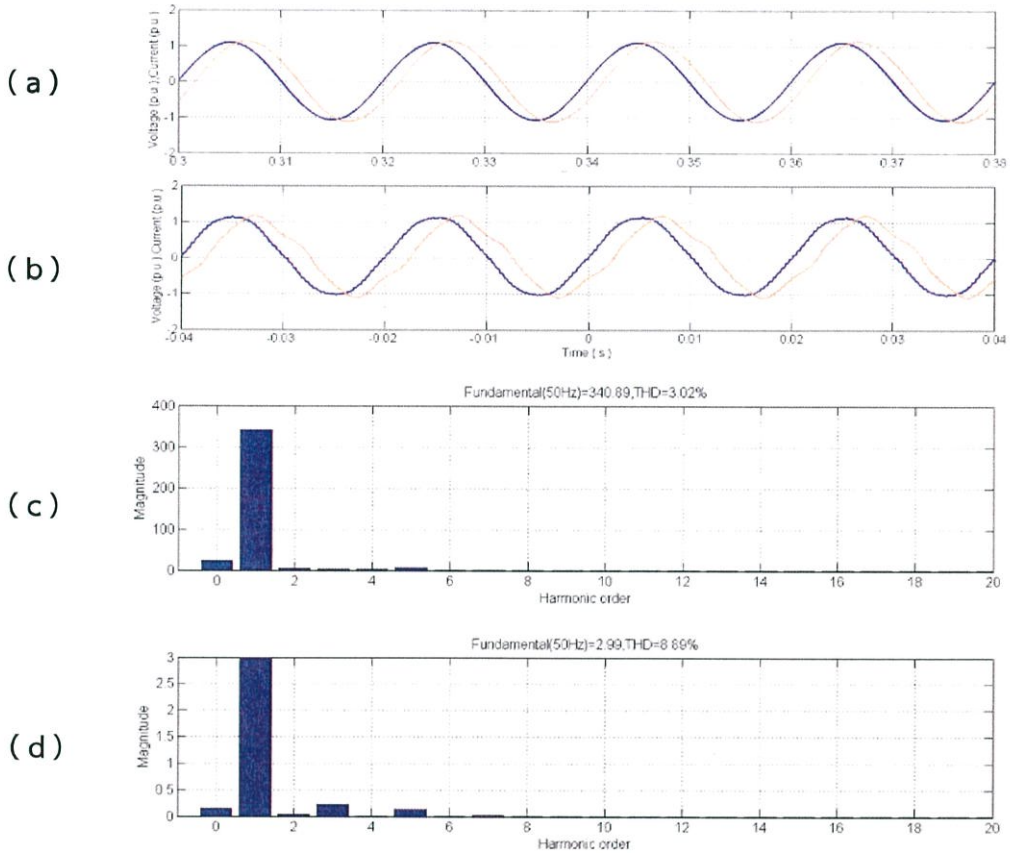


**รูปที่ 4.87** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A  
 (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ  
 (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

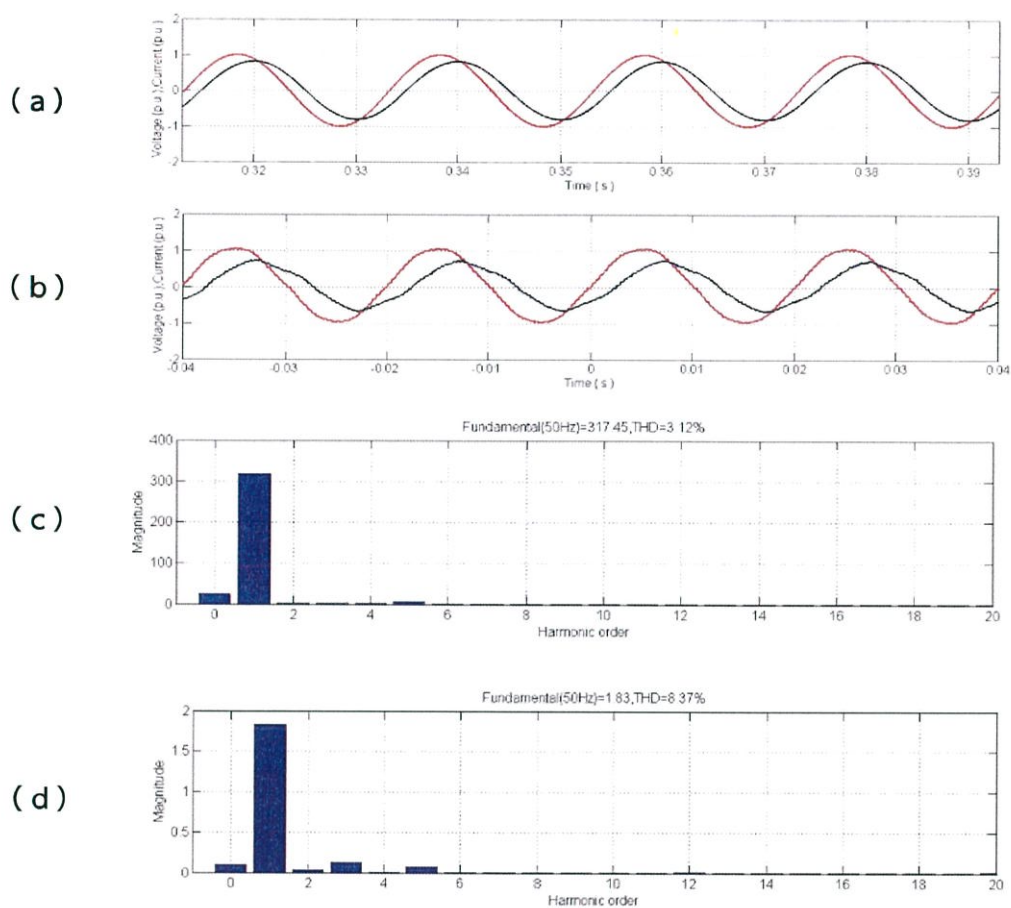


**รูปที่ 4.88** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A , B ที่โหลด 100%



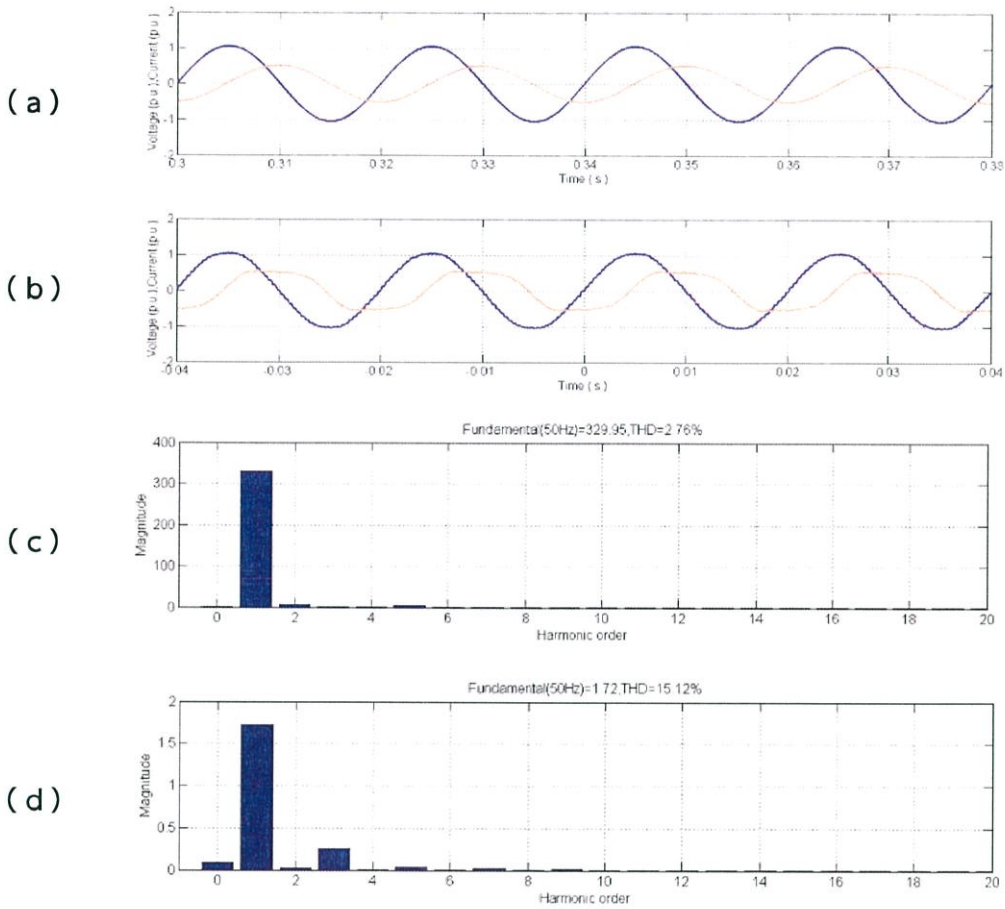
**รูปที่ 4.89** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A  
 (c) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ  
 (d) ฮาร์มอนิกสัณดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A



**รูปที่ 4.90** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส C (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส C

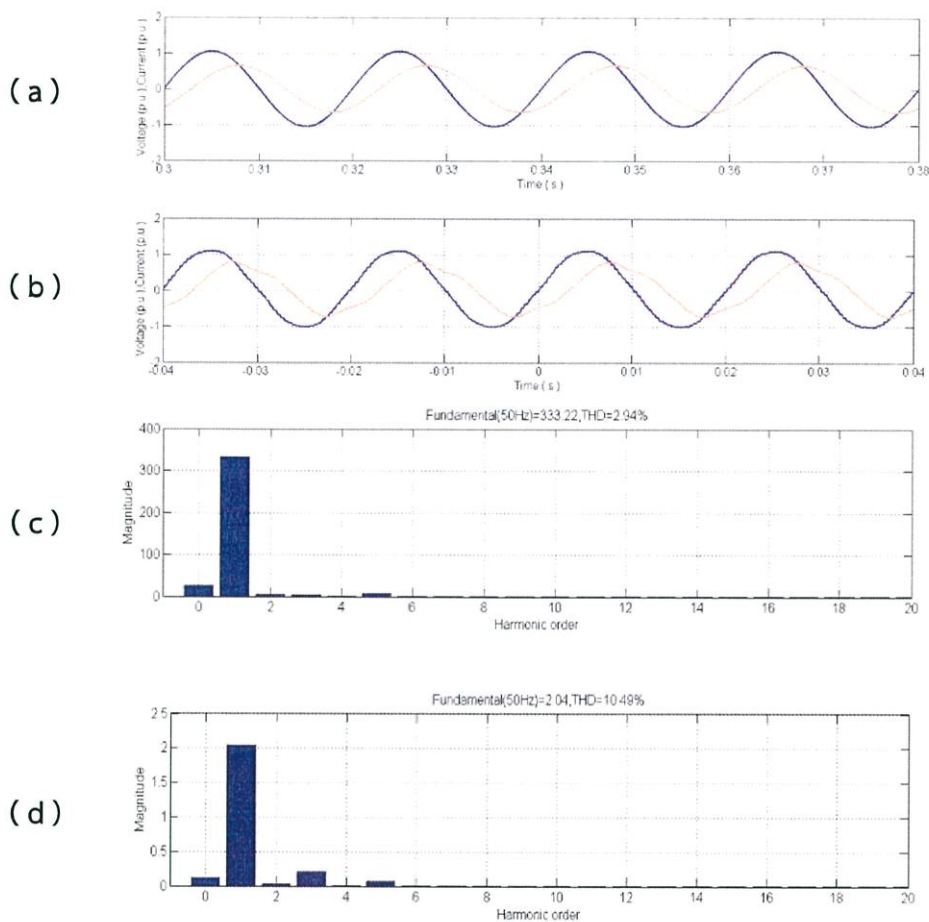
### 4.3.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 0%



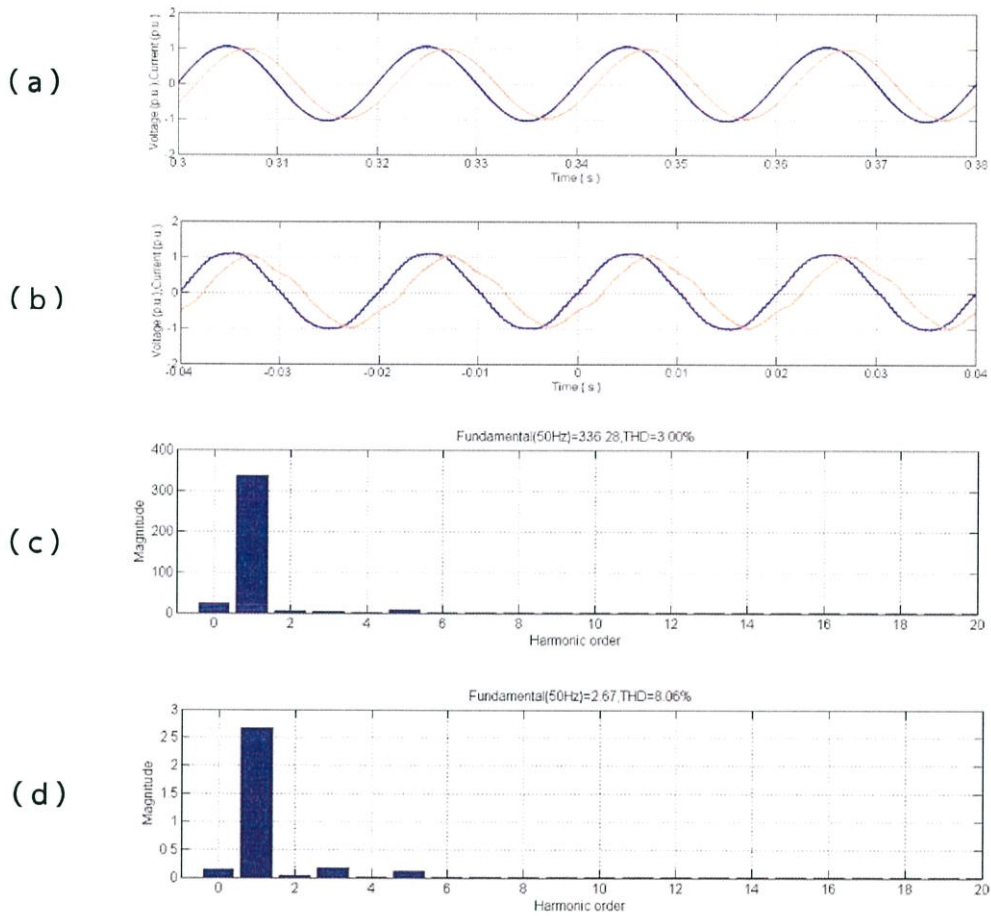
**รูปที่ 4.91** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 50%



**รูปที่ 4.92** (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์มอนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส 5% ที่เฟส A , B , C ที่โหลด 100%



รูปที่ 4.93 (a) สัญญาณจากการจำลองเฟส A (b) สัญญาณจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A (c) ฮาร์โมนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A และ (d) ฮาร์โมนิกส์อันดับต่าง ๆ ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบ (LAB TEST) เฟส A

จากหัวข้อ 4.3.3 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ จะแสดงค่า %THD ได้ดังต่อไปนี้

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.14\%$ และ $\%THD_i = 15.37\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.05\%$ และ $\%THD_i = 12.18\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.32\%$ และ $\%THD_i = 11.43\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.21\%$ และ $\%THD_i = 8.21\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.06\%$ และ $\%THD_i = 8.21\%$
	เฟส B จะมีค่า $\%THD_v = 3.24\%$ และ $\%THD_i = 6.97\%$

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 2 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.26\%$ และ $\%THD_i = 17.20\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 2.83\%$ และ $\%THD_i = 18.53\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.10\%$ และ $\%THD_i = 12.03\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 3.04\%$ และ $\%THD_i = 11.63\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.02\%$ และ $\%THD_i = 8.89\%$
	เฟส C จะมีค่า $\%THD_v = 3.12\%$ และ $\%THD_i = 8.37\%$

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟส

ขณะที่โหลด 0%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 2.76\%$ และ $\%THD_i = 15.12\%$
ขณะที่โหลด 50%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 2.94\%$ และ $\%THD_i = 10.49\%$
ขณะที่โหลด 100%	เฟส A จะมีค่า $\%THD_v = 3.00\%$ และ $\%THD_i = 8.06\%$

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การจำลองในโปรแกรม MATLAB SIMULINK เป็นการจำลองโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 5.4 HP (4KW) 400V 50 Hz 1430 RPM ขับโหลด แบบ No Load (0%) , Half Load (50%) , Full Load (100%) โดยแบ่งการจำลองทั้งหมดออกเป็น 6 กรณีดังต่อไปนี้

- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล
- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส สูงกว่าปกติ
- เกิดการจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส
- การเกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้า
- การเกิดความถี่ในระบบไม่คงที่

การทดสอบ ( LAB TEST ) โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 1 HP 380V 50 Hz 1400 RPM มาขับโหลด แบบ No Load ( 0% ) , Half Load ( 50% ) , Full Load ( 100% ) โดยแบ่งการทดสอบทั้งหมดออกเป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้

- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล
- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ
- แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

ในการทดลองปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์โดยไม่ผ่านวงจรควบคุมคุณภาพไฟฟ้า เพื่อจะจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ตามที่ระบุในขอบเขต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสดังนี้

##### 5.1.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ จะทำให้เกิดความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก  $I^2R$  ที่ขดลวดของเฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าตามค่าพิกัด ( 380V<sub>L-L</sub> ) เช่นในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟสที่เฟส A , B ค่ากระแสในเฟส C จะมีขนาดเกินค่าพิกัดทำให้ความเป็นฉนวนของขดลวดลดลง และอายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลง และกระแสโรเตอร์จะเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณที่ผิดปกติซึ่งจะทำให้สัญญาณของแรงบิดทางไฟฟ้าเกิดการกระเพื่อมตามด้วย และมอเตอร์เกิดการสั่นซึ่งทำให้หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล อย่างไรก็ตามถ้า

มอเตอร์ที่มีการใช้งานไม่หนักหรือมีโหลดน้อย การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลมาจากการลดลงของแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำกว่ากระแสพิคกในมอเตอร์

เมื่อพิจารณาในทุกกรณีของสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ จะพบว่า สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟสจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์เกิดกระแสที่เฟส C สูงที่สุด และสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วต่ำที่สุด

#### 5.1.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ จะทำให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดของสเตเตอร์ของเฟสที่มีแรงดันไฟฟ้าตามค่าพิคก ( $380 V_{L-L}$ ) มีค่าต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเล็กน้อย ส่วนกระแสของเฟสที่เกินกว่าปกติจะเกิดความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก  $I^2R$  ที่ขดลวด ทำให้ความเป็นฉนวนของขดลวดลดลงและอายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลง และกระแสโรเตอร์จะเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณที่ผิดปกติซึ่งจะทำให้สัญญาณของแรงบิดทางไฟฟ้าเกิดการกระเพื่อมตามด้วย และมอเตอร์เกิดการสั่นซึ่งทำให้หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล อย่างไรก็ตามถ้ามอเตอร์ที่มีการใช้งานไม่หนักหรือมีโหลดน้อย การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลมาจากการลดลงของแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำกว่ากระแสพิคกในมอเตอร์

เมื่อพิจารณาในทุกกรณีของสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ จะพบว่า สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟสจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์เกิดกระแสที่เฟส A สูงที่สุด และสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วต่ำที่สุด

#### 5.1.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบสามเฟส

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดลองเพียงกรณีจ่ายไฟฟ้า 2 เฟสเท่านั้น เนื่องจากปกติจะมีรีเลย์ตรวจจับอยู่ ซึ่งถ้าเกิดเฟสหายจะทำให้มอเตอร์ก็จะหยุดทำงาน เพราะสภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบสามเฟสจะมีผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุดคือ กระแสในขดลวดทั้ง 2 เฟสที่จ่ายให้มอเตอร์จะมีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้จะเกิดความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก  $I^2R$  ที่ขดลวด ทำให้ความเป็นฉนวนของขดลวดลดลง และถ้าไม่มีรีเลย์ตรวจจับ อาจจะทำให้ขดลวดเกิดการลัดวงจรในขดลวดได้ และกระแสโรเตอร์จะเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณที่ผิดปกติซึ่งจะทำให้สัญญาณของแรงบิดทางไฟฟ้าเกิดการกระเพื่อมตามด้วย และมอเตอร์เกิดการสั่นซึ่งทำให้หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามถ้ามอเตอร์ที่มีการใช้งานไม่หนักหรือมีโหลดน้อย การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลมาจากการลดลงของแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำกว่ากระแสพิคกในมอเตอร์

#### 5.1.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ

เมื่อเกิดสภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติจะทำให้กระแสในขดลวดมีค่าสูงกว่าสภาวะความถี่ปกติเล็กน้อย และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าน้อยกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล ส่วนสภาวะความถี่สูงกว่าปกติจะทำให้กระแสในขดลวดมีค่าต่ำกว่าสภาวะความถี่ปกติเล็กน้อย และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่ามากกว่าสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

กรณีที่ความถี่ของระบบไฟฟ้ามีค่าต่ำลง หรือมีการนำเอามอเตอร์มาใช้งานที่ความถี่ต่ำกว่าที่มอเตอร์ได้รับการออกแบบมา นอกจากความเร็ว ซิงโครนัส ( synchronous speed :  $N_s$  ) ของมอเตอร์จะลดลง แล้ว ยังส่งผลถึงความเร็วที่ใช้ในการขับเคลื่อนอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์ ( stator-flux ) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างอำนาจแม่เหล็กสูงขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในขดลวดและแกนเหล็กก็จะสูงขึ้นด้วย จึงสรุปได้ว่า หากความถี่ของระบบไฟฟ้าลดลงจะมีผลทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง และมอเตอร์จะร้อนมากขึ้น

ในทำนองเดียวกันถ้าหากความถี่มีค่าสูงขึ้น หรือมีการนำเอามอเตอร์มาใช้งานที่ความถี่สูงกว่าที่มอเตอร์ได้รับการออกแบบมา ความเร็วมอเตอร์จะสูงขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์และกระแสที่ใช้สร้างอำนาจแม่เหล็กจะลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ลดลง ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพราะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงขึ้น ทำให้มีการระบายความร้อนที่ดี แต่ความสามารถในการรับสภาวะเมื่อเกิดการใช้เกินกำลัง ( maximum overload capacity ) จะลดลง

เมื่อพิจารณาในทุกกรณีของสภาวะความถี่ผิดปกติ จะพบว่า

สภาวะความถี่น้อยกว่าปกติจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์เกิดกระแสที่เฟส A , B , C สูงที่สุด และสภาวะความถี่น้อยกว่าปกติจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วต่ำที่สุด

#### 5.1.5 สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์

เมื่อเกิดสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสศูนย์ จะไม่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ แต่จะส่งผลกระทบต่อความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

เมื่อเกิดสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ดังนั้นแรงบิดทางไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนจะไปเสริมกับแรงบิดทางแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน ฉะนั้นแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นเล็กน้อย และกระแสในขดลวดมีค่าสูงกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล

เมื่อเกิดสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางสวนทางกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่มูลฐาน ดังนั้นแรงบิดทางไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนจะไปต้านกับแรงบิดทางแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนของความถี่มูลฐาน ฉะนั้นแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล และจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่ำลงเล็กน้อย และกระแสในขดลวดมีค่าสูงกว่าในสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสบวก

เมื่อพิจารณาในทุกกรณีของสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ จะพบว่า

สภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์เกิดกระแสที่เฟส A , B , C สูงที่สุด และสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับเฟสลบจะส่งผลกระทบต่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วต่ำที่สุด

จากการศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส จะสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อใช้ในการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย และการนำไปใช้ในการซ่อมบำรุงรักษามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสที่เกิดผลมาจากคุณภาพไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้

### 5.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

การจำลองสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในปฏิญานิพนธ์นี้ได้พิจารณาจากการเกิดขึ้นจริง ในอุตสาหกรรมมอเตอร์ ที่มีสภาวะของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสเกิดขึ้นได้ทั้งแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ และแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าค่าปกตินั้น แต่เนื่องจากมอเตอร์ต่อได้ทั้งแบบสตาร์และเดลต้า และถึงแม้ว่ามอเตอร์ที่ต่อแบบสตาร์ก็จะไม่ต่อสายนิวตรอน ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์เป็นโหลดสมดุลและทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็จะมีประหยัดด้วยจากลักษณะของการต่อวงจรดังกล่าวนี้ ทำให้ในสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลก็จะส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมที่ขดลวดมอเตอร์แตกต่างกันออกไปบ้างเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลการจำลองที่ได้นี้สามารถนำไปสู่สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ดีขึ้นได้ ทั้งแนวทางการทำงาน การป้องกัน และการวินิจฉัยต่อไปได้

## เอกสารอ้างอิง

- [ 1 ] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรไฟฟ้า 1, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [ 2 ] เฉลิมชาติ มานพ, เอกสารประกอบการสอนการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [ 3 ] รศ.ดร. พิชิต ล้ำยอง, เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [ 4 ] Analysis of Repairs on Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Performance Edson da Costa Bortoni, Senior Member, IEEE, Jamil Haddad, Afonso Henriques Moreira Santos, Erick Menezes de Azevedo, and Roberto Akira Yamachita
- [ 5 ] K.V. Vamsi Krishna Lecon Systems, “Effects of unbalance voltage on induction motor current and its operation performance”, 2001

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
บทความทางวิชาการ

## การศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ( A Study the Effects Power Quality on Induction Motor's Performance )

กิตติชัย ฮวบน้อย เทพพร อาจละออ ธนะสิทธิ์ แสงประยูร และนิทิพร รักษายศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ลอดกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: houbnoi@hotmail.com

### บทคัดย่อ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่มีใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสจึงเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ลดเวลาและค่าใช้จ่าย โครงการนี้จึงนำเสนอผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสในกรณีต่างๆที่พบเป็นประจำในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อจะนำไปวิเคราะห์หาข้อสรุปและนำไปแก้ไขปัญหาคืออย่างถูกต้องและเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาโครงการนี้จำลองจากโปรแกรม MATLAB SIMULINK พบว่า สามารถจำลองปัญหาต่างๆได้อย่างครบถ้วนครอบคลุมกับปัญหาที่พบเป็นประจำในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในการทดสอบกับมอเตอร์จริงบางปัญหาไม่สามารถทำการจำลองได้

### Abstract

A 3-phase Induction Motor is the part of machines widely used in many industries, so the 3-phase Induction Motor maintenance is the most important part of the quality control of yielding and increasing productive efficiency that reduce time and expenses. This project presents the effects of power quality on 3-phase induction motor's performance. In each case, it is usually found in the industries in order to analyze summaries and solve problems correctly, and it is suitable for what they happened. This study result stimulates from MATLAB STIMULINK. It is informed that it can stimulate a lot of problems covered in the industries. In the actual motor test, they can't be stimulated.

### 1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกวันนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ( Squirrel Cage Type ) แต่ในการทำงานจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะได้รับผลกระทบจากแหล่งจ่ายที่จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีประสิทธิภาพต่ำลง ซึ่งอาจจะเกิดได้หลายสาเหตุ ดังนั้นเราจึงต้องศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสที่มีโอกาสเกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมสูง เพื่อนำไปป้องกัน และ วิเคราะห์เมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวจะได้แก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม และลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ดังนั้นจึงได้มีการศึกษา และวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ที่พบบ่อยในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างครอบคลุมขึ้นในโครงการฉบับนี้

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสถานะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

นิยามของแรงดันไฟฟ้าตกหรือ Under Voltage ที่ให้ไว้โดย IEEE Std. 1100-1992 คือการลดลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ณ ความถี่กำลังไฟฟ้า ( 50 Hz ) เป็นช่วงเวลามากกว่า 2-3 วินาที แรงดัน Sag เองก็จัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเรื่องแรงดัน ไฟฟ้าตกเช่นกันแค่แยกแรงดัน Sag ออกไปต่างหากจากนิยามของแรงดันไฟฟ้าตก ( Under Voltage )

**2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ**

นิยามของแรงดันไฟฟ้าเกินหรือ Over Voltage หากอ้างอิง IEEE Std. 1100-1992 จะได้ว่า การเพิ่มสูงขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแส-สลับ ( AC ) ที่ความถี่กำลังไฟฟ้า ( 50 Hz ) โดยมีช่วงเวลาก่อเกิดขึ้นนานมากกว่า 2-3 วินาที ผลที่ความนั้นก็คือ จะเกิดความหลากหลายเป็นอย่างมากสำหรับลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเกินไม่ว่าจะเป็นลักษณะของรูปคลื่นซึ่งมีทั้งลักษณะทรานเซียนต์หรือเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ

**2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส**

การเกิดความผิดปกติหรือ ฟอลต์ ( Fault ) คือ การเกิดความผิดปกติที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ ความผิดปกติแบบอนุกรม ( Series Fault ) ซึ่งจะเกิดจากการที่มีการเปิดวงจร เช่น สายไฟขาดหรือหลุด หรืออุปกรณ์บางอย่างหลุดคั้งนั้นจึงเรียกความผิดปกตินี้ได้อีกชื่อว่า ความผิดปกติแบบเปิดวงจร ( Open-Circuit Faults ) ซึ่งฟอลต์ชนิดนี้มีโอกาสเกิดได้น้อย

**2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะความถี่ผิดปกติ**

ผลกระทบที่ความถี่ต่ำ

ความถี่ต่ำทำให้ง่ายในการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกรวย การบิด , การกัก และมอเตอร์ชนิดลุดสำหรับกรวยขนส่ง เช่นรถไฟ อย่งไรก็ตามความถี่ต่ำ ยังทำให้เกิดการสูญเสียความต้านทานซึ่งเป็นสัดส่วนกับความถี่

ผลกระทบที่ความถี่สูง

ที่ความถี่สูงมาก ๆ กระแสจะไม่ไหลในเส้นลวด แต่ไหลบนพื้นผิวของลวดภายในความหนาของผิวเล็กน้อย ความลึกของผิวจะมีความหนาที่ให้ความหนาแน่นกระแสลดลง 63% แม้ที่ความถี่ค่อนข้างต่ำที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า ( 50-60 Hz ) การกระจายไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้ายังคงเกิดขึ้นในค่านำที่หนาพอ ดังนั้น ค่านำที่กระแสสูงมักจะกลวงเพื่อลดมวลและค่าใช้จ่าย

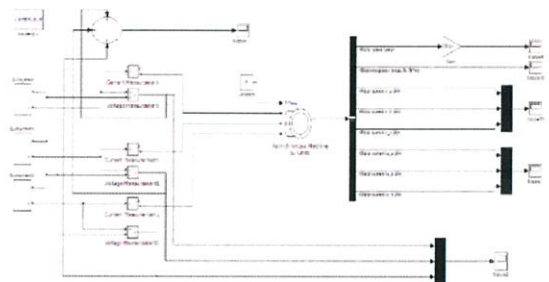
**2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเกิดฮาร์โมนิกส์**

ฮาร์โมนิกส์ ( Harmonic ) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ ( Sine Wave ) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ( Fundamental Frequency ) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่าฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ( Second Harmonic )

ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ ( Harmonic Distortion ) คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า ( Power Waveform ) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ ( Sine Wave ) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล ( Fundamental ) และฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ เข้าด้วยกัน

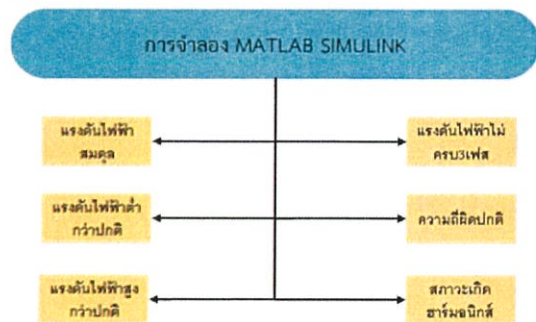
**3. วิธีการทดสอบ**

**3.1 วงจรที่ใช้ในการจำลองใน MATLAB SIMULINK**



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการจำลองใน MATLAB SIMULINK

**3.2 แผนภาพแสดงสภาวะต่าง ๆ ที่นำมาจำลองในโปรแกรม MATLAB SIMULINK**

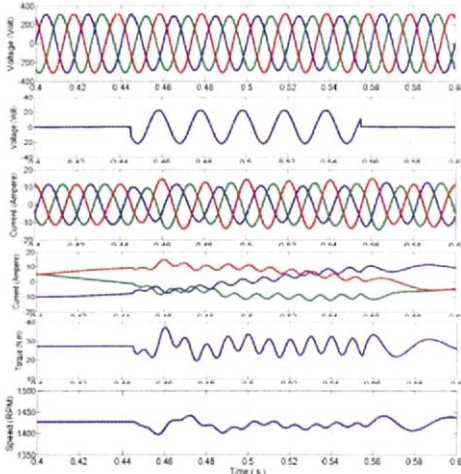


รูปที่ 2 แผนภาพแสดงสภาวะต่าง ๆ ที่นำมาจำลองในโปรแกรม MATLAB SIMULINK

4. ผลการทดลอง

4.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟส 5% ที่เฟส A, B ที่โหลด 100%

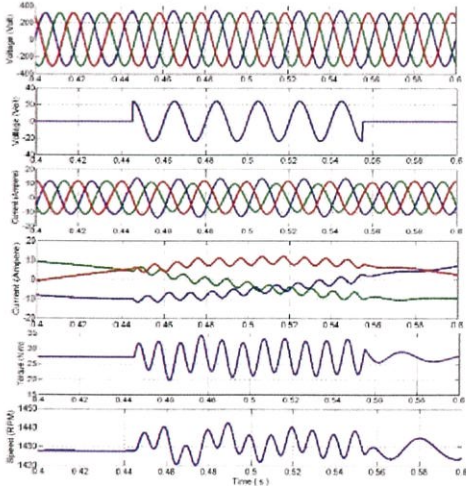


รูปที่ 3 จากบนลงล่างคือ แรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส กระแสเดเตอร์

กระแสโรเตอร์ แรงบิด และความเร็วยรอบของมอเตอร์ ตามลำดับ  
หมายเหตุ เฟส A คือ เส้นสีน้ำเงิน เฟส B คือ เส้นสีเขียว เฟส C คือ เส้นสีแดง

4.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 5% ที่เฟส A ที่โหลด 100%

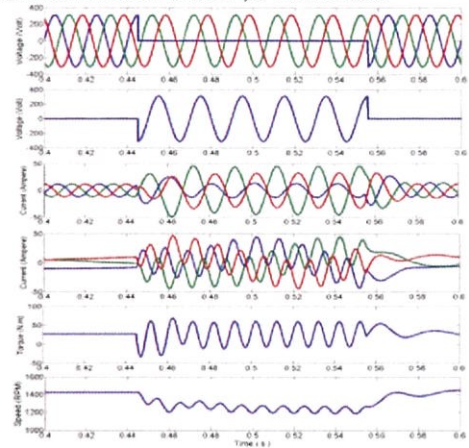


รูปที่ 4 จากบนลงล่างคือ แรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส กระแสเดเตอร์

กระแสโรเตอร์ แรงบิด และความเร็วยรอบของมอเตอร์ ตามลำดับ  
หมายเหตุ เฟส A คือ เส้นสีน้ำเงิน เฟส B คือ เส้นสีเขียว เฟส C คือ เส้นสีแดง

4.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

สภาวะจ่ายไฟฟ้า 2 เฟส คือ เฟส B, C ที่โหลด 100%

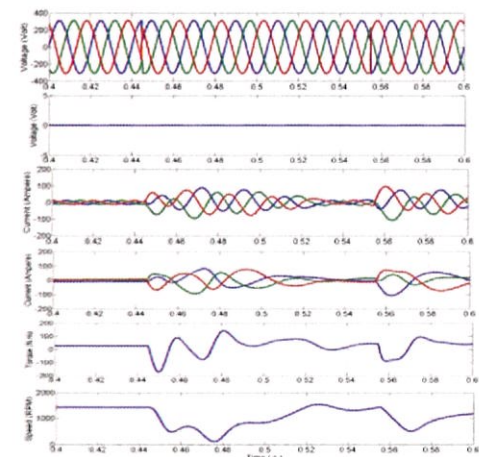


รูปที่ 5 จากบนลงล่างคือ แรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส กระแสเดเตอร์

กระแสโรเตอร์ แรงบิด และความเร็วยรอบของมอเตอร์ ตามลำดับ  
หมายเหตุ เฟส A คือ เส้นสีน้ำเงิน เฟส B คือ เส้นสีเขียว เฟส C คือ เส้นสีแดง

4.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ

สภาวะความถี่ต่ำกว่าปกติ 1% ที่โหลด 100%

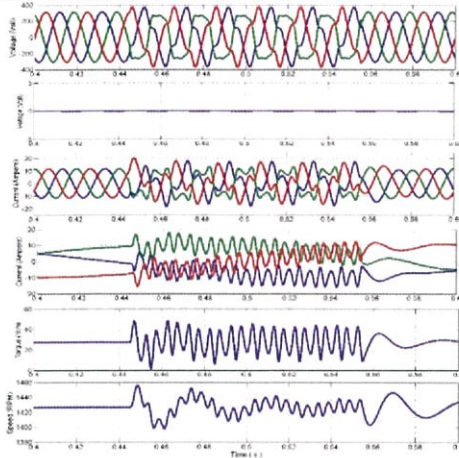


รูปที่ 6 จากบนลงล่างคือ แรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส กระแสเดเตอร์

กระแสโรเตอร์ แรงบิด และความเร็วยรอบของมอเตอร์ ตามลำดับ  
หมายเหตุ เฟส A คือ เส้นสีน้ำเงิน เฟส B คือ เส้นสีเขียว เฟส C คือ เส้นสีแดง

### 4.5 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์

สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบ ที่โหลด 100%



รูปที่ 7 จากบนลงล่างคือ แรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าผลรวม 3 เฟส กระแสสเตเตอร์ กระแสโรเตอร์ แรงบิด และความเร็วของมอเตอร์ ตามลำดับ หมายถึง เฟส A คือ เส้นสีน้ำเงิน เฟส B คือ เส้นสีเขียว เฟส C คือ เส้นสีแดง

### 5. สรุปผลการทดสอบ

#### 5.1 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ

ในเชิงความร้อน สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 2 เฟสจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด และในเชิงความเร็วมอเตอร์ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่ำกว่าปกติ 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด

#### 5.2 สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ

ในเชิงความร้อน สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 1 เฟสจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด และในเชิงความเร็วมอเตอร์ สภาวะแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสสูงกว่าปกติ 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด

#### 5.3 สภาวะแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่ครบ 3 เฟส

มีผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรณีที่ได้ทำการทดลอง อาจจะทำให้ขดลวดเกิดการลัดวงจรในขดลวดได้

#### 5.4 สภาวะความถี่ผิดปกติ

ในเชิงความร้อน สภาวะความถี่น้อยกว่าปกติจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด และในเชิงความเร็วมอเตอร์ สภาวะความถี่น้อยกว่าปกติจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด

### 5.5 สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์

ในเชิงความร้อน สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด และในเชิงความเร็วมอเตอร์ สภาวะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับเฟสลบจะส่งผลกระทบต่อมอเตอร์มากที่สุด

#### เอกสารอ้างอิง

- [ 1 ] ชัยวุฒิ ถิธรอุทัย, เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรไฟฟ้า 1, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2556.
- [ 2 ] เฉลิมชาติ มานพ, เอกสารประกอบการสอนการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [ 3 ] รศ.ดร. พิชิต ถ้ายอง, เอกสารประกอบการสอนเครื่องจักรไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554
- [ 4 ] Analysis of Repairs on Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Performance Edson da Costa Bortoni, Senior Member, IEEE, Jamil Haddad, Afonso Henriques Moreira Santos, Erick Menezes de Azevedo, and Roberto Akira Yamachita
- [ 5 ] K.V. Vamsi Krishna Lecon Systems, "Effects of unbalance voltage on induction motor current and its operation performance", 2001

#### ประวัติผู้เขียน



นาย กิตติชัย สวบน้อย จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ดากพิทยาคม ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 111 หมู่ที่ 1 ตำบลห้องฟ้า อำเภอ บ้านดาก จังหวัด ดาก 63120 โทร 08 6363 4217



นาย เทพพร อองดอ จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ดอนบอสโกวิทยา ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 549/073 ตำบลหมากแข้ง อำเภอ เมือง จังหวัด อุดรธานี 41000 โทร 09 0102 6895



นาย ธนะสิทธิ์ แสงประชูร จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน โยจินนุรณะ ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 52/2 หมู่ที่ 3 ซอยกั้นคณา ตำบล บางใหญ่ อำเภอ บางใหญ่ จังหวัด นนทบุรี 11140 โทร 08 0230 5785



นาย นิธิพร รักษายศ จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน พิบูลวิทยาลัย ปัจจุบันอาศัย อยู่ที่ 99/93 หมู่ที่ 3 หมู่บ้าน เทพรชนคร ตำบล ท่าศาลา อำเภอ เมือง จังหวัด ลพบุรี 15000 โทร 08 6347 3518

## ประวัติผู้เขียน



นาย กิตติรัช ฮวบน้อย จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ตากพิทยาคม เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษาที่ 2554 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 111 หมู่ที่ 1 ตำบล ท้องฟ้า อำเภอ บ้านตาก จังหวัด ตาก 63120 โทร 08 6363 4217



นาย เทพพร อาจละอ จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ดอนบอสโก วิทยาคม เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษาที่ 2554 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 549/073 ตำบล หมากแข้ง อำเภอ เมือง จังหวัด อุดรธานี 41000 โทร 09 0102 6895



นาย ธนะสิทธิ์ แสงประยูร จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน โยธินบูรณะ เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษาที่ 2554 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ 52/2 หมู่ที่ 3 ซอย กันตนา ตำบล บางใหญ่ อำเภอ บางใหญ่ จังหวัด นนทบุรี 11140 โทร 08 0230 5785



นาย นิธิพร รักษายศ จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน พิบูล วิทยาลัย เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษาที่ 2554 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันอาศัย อยู่ที่ 99/93 หมู่ที่ 3 หมู่บ้าน เทพราชนคร ตำบล ท่าศาลา อำเภอ เมือง จังหวัด ลพบุรี 15000 โทร 08 6347 3518