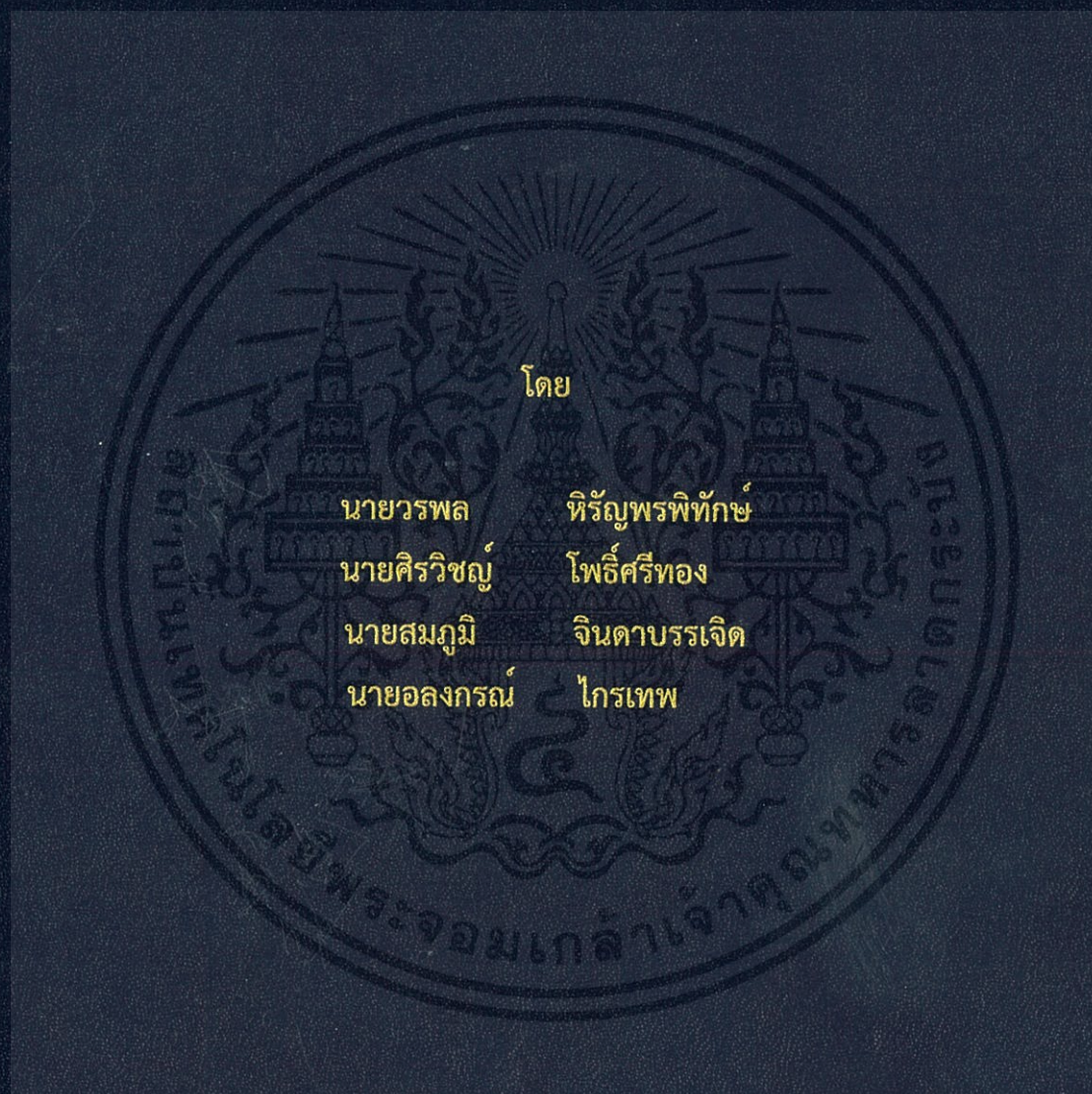


การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง  
DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SET FOR HIGH VOLTAGE  
DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง  
DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SET FOR HIGH VOLTAGE  
DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SET FOR HIGH VOLTAGE  
DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง  
DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SET FOR HIGH VOLTAGE  
DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อรรถพล เ่ง่าพิทักษ์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ผู้จัดทำ

- 
1. นายวรพล หิรัญพรพิทักษ์
  2. นายศิริวิชญ์ โพธิ์ศรีทอง
  3. นายสมภูมิ จินดาบรรเจิด
  4. นายอลงกรณ์ ไกรเทพ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เเง้าพิทักษ์กุล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

นายวรพล หิริญพรพิทักษ์

นายศิริวิชญ์ โพธิ์ศรีทอง

นายสมภูมิ จินดาบรรเจิด

นายอลงกรณ์ ไกรเทพ

ร.ศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการสร้างชุดทดลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับไฟฟ้าเป็นโลหะ ซึ่งชุดทดลองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสในห้องปฏิบัติการแรงดัน 400 V จากนั้นนำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเรกติไฟเออร์ (Rectifier) ก่อนส่งผ่านชุดจำลองสายส่ง หลังจากส่งจ่ายกระแสตรงผ่านสายส่งก่อนเข้าโหลดนั้นทำการแปลงกลับเป็นกระแสสลับอีกครั้งด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการทดลองทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้สวิตช์ปรับเลือกค่าเพื่อจำลองความยาวของสายส่งตั้งแต่ 150 – 600 กิโลเมตร โดยทำการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของสายส่งที่ความยาวสายระยะต่าง ๆ ขณะจ่ายโหลด พฤติกรรมของสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน และพฤติกรรมของสายส่งเมื่อเปลี่ยนชนิดโหลด

# DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SET FOR HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS

MR. WORAPOL HIRANPORNPI TAK

MR. SIRAWICH PHOSRITHONG

MR. SOMPOOM CHINDABUNCHERD

MR. ALONGKORN KRAITEP

Assistant.Prof.Dr. ATTHAPOL NGAOPITAKKUL Supervisor

Year 2016

## ABSTRACT

This project presents HVDC (High Voltage Direct Current Transmission Line) experiment set. By using monopolar with metal return path. The experiment set have been supplied by three phase voltage source 400 V from operation room then transform AC voltage to DC voltage by using rectifier. Before transmits current to loads on terminal, there have to transform DC current to AC current by using inverter. In experiment, there have to be adjusted transmission line's parameters by selector switch multiple steps for simulate HVDC transmission line model at distance from 150 - 600 km. For studied about fault on transmission line, Behavior of transmission line at different distances during supply load, and when the load type change.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาและการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่อนุเมติเห็นชอบให้จัดทำโครงการวิศวกรรม และได้กรุณาให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ รวมทั้งข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณณัฐนนท์ พันธุ์นิล และคุณสันติพันธ์ อนันต์วัฒนาพร รวมทั้งพี่ ๆ ปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษาเรื่องการทำโครงการวิศวกรรม และคอยช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการจัดทำโครงการวิศวกรรมให้เป็นไปได้ด้วยดีมาโดยตลอด

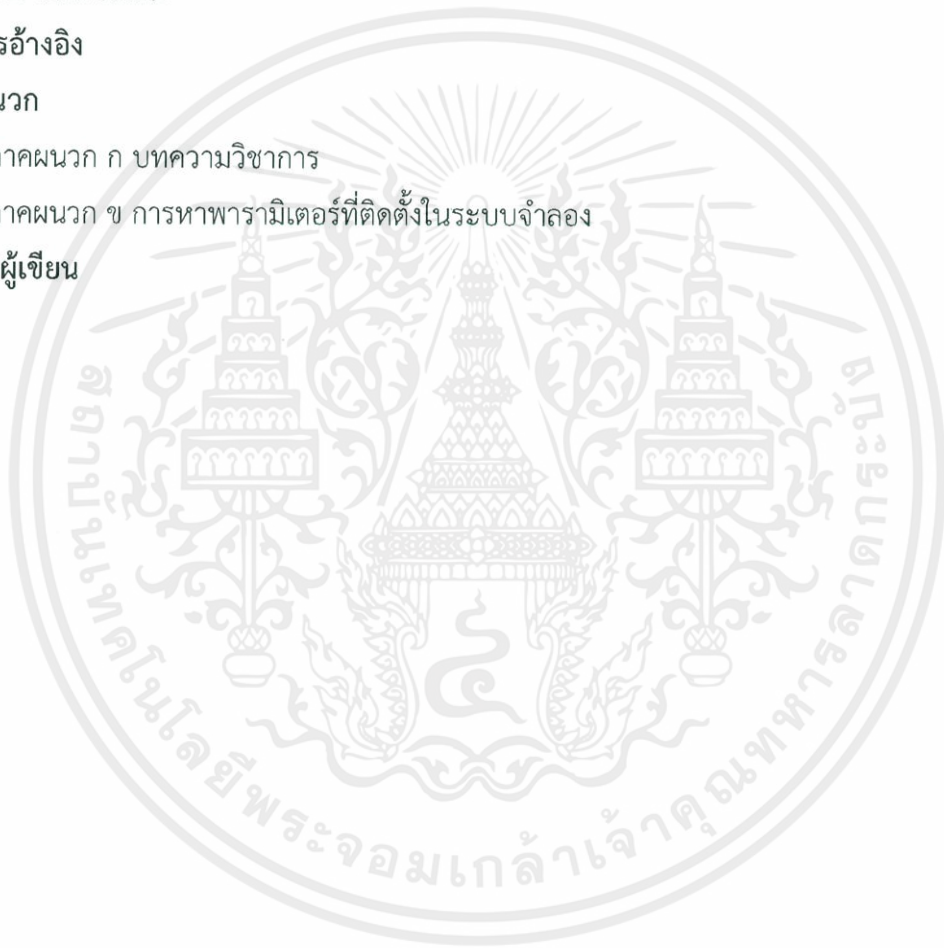
ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	7
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	8
1.5 แผนการดำเนินงาน	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	12
1.6.1 ประโยชน์เชิงวิศวกรรม	12
1.6.2 ประโยชน์เชิงอนุรักษ์พลังงาน	12
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	13
2.2 รูปแบบของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	13
2.3 คอนเวอร์เตอร์ (Converter)	18
2.4 ตัวกรองไฟฟ้า	24
2.5 พารามิเตอร์สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	26
2.6 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	26
2.7 ระบบเพอร์ยูนิต (Per-Unit System)	27
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	29
3.1 การออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	29
3.2 การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์	43
3.3 การทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	52

บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 การจำลองระบบสายส่งของชุดทดลอง	54
4.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง	69
4.3 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	112
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	142
5.1 สรุปการทดลอง	142
5.2 ข้อเสนอแนะ	144
เอกสารอ้างอิง	145
ภาคผนวก	151
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	152
ภาคผนวก ข การหาพารามิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบจำลอง	157
ประวัติผู้เขียน	164



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนการสร้างระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในประเทศจีน	2
2.1	การเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระบบสายส่งเอชวีดีซี	13
2.2	คอนเวอร์เตอร์แบบคูลูแบค (Back-to-Back Converter)	14
2.3	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดินหรือทะเล	14
2.4	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะ	15
2.5	ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะทำงานในสภาวะปกติ	15
2.6	ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับขั้วใดขั้วหนึ่ง	16
2.7	ระบบส่งกำลังแบบขั้วคู่ (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับคอนเวอร์เตอร์	16
2.8	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะและทำงานแบบขั้วเดียว (Monopolar)	17
2.9	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) ที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าและทำงานแบบขั้วเดียว (Monopolar)	17
2.10	คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด	18
2.11	ลำดับการนำกระแสของไดโอด	19
2.12	การคอมมิวเตชันขณะคอนเวอร์เตอร์ทำงาน	20
2.13	คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติไฟเออร์	21
2.14	คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมจุดชนวน $\alpha$	21
2.15	วงจรมุมของเรกติไฟเออร์	22
2.16	คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์	23
2.17	วงจรมุมของอินเวอร์เตอร์	23
2.18	วงจรมุมพาย ( $\pi$ ) ของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	26
3.1	โครงสร้างระบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	29
3.2	แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง	31
3.3	หม้อแปลงสามเฟสปรับค่าได้พิกัด 30A 0 - 420 Vac	32
3.4	วงจรป้องกันชุดทดลอง	33

3.5	คอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดัน	34
3.6	วงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	35
3.7	ด้านหน้าชุดทดลองระบบสายส่ง	35
3.8	ด้านหลังชุดทดลองระบบสายส่ง	36
3.9	ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ	36
3.10	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลเวอร์ไมก้า	38
3.11	ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดกำลัง 200 W	40
3.12	ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดกำลัง 1000 W	40
3.13	วงจรของไหลแต่ละเฟสที่ใช้ในการทดลอง	42
3.14	โหนดของชุดทดลองระบบสายส่ง	42
3.15	ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV - 2kA)	43
3.16	ไดอะแกรมภายในระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ	44
3.17	แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง	46
3.18	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของแหล่งจ่าย	47
3.19	รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส	47
3.20	ไดอะแกรมภายในของระบบย่อยของหม้อแปลง	48
3.21	รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด	48
3.22	รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์สำหรับเรกติไฟเออร์	49
3.23	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมมมจูดชนวน	49
3.24	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง	50
3.25	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์	50
3.26	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมพีดีบีเบิลยูเอ็ม	51
3.27	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของโหนด	51
3.28	ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของโหนด	52
3.29	ไดอะแกรมเส้นเดียวของการทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	53
4.1	ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที	55

4.2	ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (450V - 1.667A)	59
4.3	ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (450V - 1.667A) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที	60
4.4	ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (500V - 1.5A)	64
4.5	ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (500V - 1.5A) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที	65
4.6	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร	74
4.7	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร	76
4.8	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร	78
4.9	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร	80
4.10	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร	82
4.11	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร	84
4.12	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W	67
4.13	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W	68
4.14	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W	91
4.15	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W	93
4.16	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W	95
4.17	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W	97
4.18	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V	104
4.19	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V	106
4.20	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V	108
4.21	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V	110
4.22	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร	117
4.23	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร	118
4.24	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร	119
4.25	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร	120
4.26	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร	121
4.27	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร	122

4.28	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W	128
4.29	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W	129
4.30	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W	130
4.31	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W	131
4.32	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W	132
4.33	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W	133
4.34	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V	138
4.35	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V	139
4.36	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V	140
4.37	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V	141



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ปี 2556 - 2559	3
1.2 ตารางแผนการดำเนินโครงการ	11
3.1 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	37
3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	39
3.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	41
3.4 เปรียบเทียบข้อมูลของระบบตัวอย่างและระบบที่ออกแบบ	44
4.1 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	70
4.2 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	71
4.3 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่โหลด	72
4.4 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อ เปลี่ยนระยะสายส่ง	73
4.5 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	87
4.6 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	88
4.7 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	89
4.8 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	90
4.9 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และเรกติไฟเออร์	100
4.10 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	101
4.11 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	102

4.12	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน	103
4.13	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	113
4.14	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	114
4.15	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่โหลด	115
4.16	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง	116
4.17	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	124
4.18	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	125
4.19	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	126
4.20	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	127
4.21	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	134
4.22	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	135
4.23	ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	136
4.24	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน	137

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission : HVDC Transmission) มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ได้เปรียบกว่าระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง เช่น ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ง่ายต่อการควบคุม การไหลของกำลังไฟฟ้า ระยะทางไกลแต่ต้นทุนต่ำ และความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระยะไกล เป็นต้น เทคโนโลยีระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศนำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก เช่น ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสองขั้ว (Bipolar system) ในโครงการ BritNed, Great Britain เชื่อมต่อระหว่างประเทศเนเธอร์แลนด์และสหราชอาณาจักร เริ่มใช้งานในช่วงปี ค.ศ. 2011 ใช้สายเคเบิลใต้น้ำที่พิกัด 1,000 MW  $\pm$ 450 kV ระยะทาง 260 กิโลเมตร ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการนำเทคโนโลยีระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพลัส (HVDC PLUS) ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่จากบริษัท Siemens มาใช้ครั้งแรกกับโครงการ Trans Bay Cable สามารถส่งจ่ายได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน มีพิกัดกำลังไฟฟ้าจริง 400 MW และพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน  $\pm$ 170 Mvar ที่พิกัดแรงดัน  $\pm$ 200 kV ในประเทศอินเดียมีการใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอยู่หลายระบบ เช่น โครงการ Ballia-Bhiwadi ที่เริ่มใช้งานในปี ค.ศ. 2010 เป็นระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสองขั้วที่พิกัดกำลัง 2,500MW  $\pm$ 500kV ระยะทาง 800 กิโลเมตร และโครงการล่าสุด Mundra-Haryana ที่ใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสองขั้วที่มีระยะทาง 960 กิโลเมตร ที่พิกัด 2,500 MW  $\pm$  500 kV เริ่มใช้งานในปี ค.ศ. 2011 ประเทศจีนถือว่าเป็นประเทศที่ใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมากที่สุดในภูมิภาคเอเชีย ซึ่งในช่วงปี ค.ศ. 2010 ถึง 2020 มีแผนการสร้างมากถึง 35 โครงการ รวมพิกัดการส่งกำลังทั้งหมด 217 GW ดังรูปที่ 1.1 [1]



รูปที่ 1.1 แผนการสร้างระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในประเทศจีน [1]

ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเริ่มเข้ามามีบทบาทในประเทศไทยมากขึ้น นอกจากระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้ากुरुณ (Gurun) ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (Tenaga Nasional Berhad : TNB) และสถานีไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าคลองแวงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อีกหนึ่งโครงการระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของประเทศจีน Jinghong-Thailand ที่มีแผนการจะสร้างเชื่อมต่อกับประเทศไทย นอกจากการใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในการส่งพลังงานปริมาณมากแล้ว ยังมีการนำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาเชื่อมต่อแหล่งพลังงานทางเลือกที่อยู่ห่างไกล หรืออยู่นอกชายฝั่งทะเล เช่น ฟาร์มกังหันลม ฟาร์มโซลาร์ เป็นต้น

ปัจจุบันพลังงานโฟโตวอลเทอิกถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้น มีเทคโนโลยีการผลิตที่น่าเชื่อถือและมีการเติบโตอย่างรวดเร็วทั่วโลก ตามรายงานของสำนักงานพลังงานสากล (International Energy Agency : IEA) จากงานวิจัยและพัฒนารวมทั้งการเติบโตทางภาคอุตสาหกรรมได้ทำให้เกิดความหลากหลายของเทคโนโลยีโฟโตวอลเทอิก ซึ่งตลาดของพลังงานโฟโตวอลเทอิกมีการเติบโตขึ้นโดยเฉลี่ย 40 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา สำนักงานพลังงานสากลประมาณการว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโฟโตวอลเทอิก จะคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั่วโลกภายในปี ค.ศ. 2030 และเพิ่มเป็น 11 เปอร์เซ็นต์ ภายในปี ค.ศ. 2050 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 2300 ล้านตันต่อปี

ตลาดซื้อขายไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในประเทศอินเดียประสบความสำเร็จ โรงไฟฟ้าพลังงานโฟโตโวลเทอิกขนาดใหญ่เป็นที่แพร่หลายในประเทศอย่างรวดเร็ว มีการนำโรงไฟฟ้าพลังงานโฟโตโวลเทอิกเชื่อมต่อเข้าโครงข่ายไฟฟ้าใช้งาน [2] โรงไฟฟ้าพลังงานโฟโตโวลเทอิกขนาดใหญ่ส่วนมากตั้งอยู่ไกลจากศูนย์กลางโหลด ในประเทศที่กำลังพัฒนาหลายประเทศจึงนำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาใช้เพื่อลดการสูญเสียในการส่งจ่ายระยะทางไกล ในทางเศรษฐศาสตร์และด้านเทคนิคการใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงถือว่าน่าสนใจเมื่อต้องส่งจ่ายระยะทางไกล [3] หนึ่งในสายส่งแบบไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงที่ยาวที่สุดในโลกมีการใช้งานอยู่ในประเทศอินเดียโดยส่งจ่ายกำลังประมาณ 2,000 MW จากโครงข่ายไฟฟ้าในรัฐ Talcher ทางตะวันออกไปยังตะวันตก รัฐ Andhra Pradesh และรัฐ Tamil Nadu เป็นระยะทาง 1,400 กิโลเมตร ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ระดับแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงประสิทธิภาพสูงสำหรับแหล่งพลังงานโฟโตโวลเทอิก เทคโนโลยีที่ต่างกันจะมีพิกัดแรงดันและกระแสที่ต่างกันขึ้นซึ่งอยู่กับพิกัดกำลังการเชื่อมต่อกับกลุ่มพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เทคโนโลยีต่าง ๆ โดยใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงเป็นแนวคิดแบบใหม่ ซึ่งสามารถลดกำลังสูญเสียจากการส่งจ่ายได้ในกรณีระยะทางไกล [4-6]

จากตารางผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทนปี พ.ศ. 2556 – 2559 [7] การพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตการใช้พลังงานทดแทน เห็นว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีจำนวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นสูงมาก

ตารางที่ 1.1 ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ปี 2556 – 2559 [7]

พลังงานทดแทน	ผลการดำเนินงาน (MW)				เป้าหมายปี 2579
	ปี 2556	ปี 2557	ปี 2558	ปี 2559 (ม.ค. – พ.ย.)	
1. แสงอาทิตย์	823.46	1298.51	1419.58	2146.00	6000.00
2. พลังงานลม	222.71	224.47	233.90	305.74	3002.00
3. พลังงานน้ำขนาดเล็ก	108.8	142.01	172.12	182.08	376.00
4. ชีวมวล	2320.78	2451.82	2726.60	2811.89	5570.00
5. ก๊าซชีวภาพ	265.23	311.5	372.51	421.77	1280.00
6. ชยะ	47.48	65.72	131.68	145.28	550.00
7. พลังงานน้ำขนาดใหญ่	-	-	2906.40	2906.40	2906.40
รวม	3788.46	4494.03	7962.79	8919.16	19684.40

ในอนาคตอันใกล้นี้ มีโอกาสเป็นได้มากที่จะมีการสร้างแหล่งพลังงานทดแทนขนาดใหญ่จากแสงอาทิตย์ ดังนั้นการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งผลิตหลาย ๆ แหล่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะแหล่งผลิตอยู่ห่างจากผู้ใช้ไฟฟ้ามาก การเชื่อมต่อแหล่งผลิตต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นการไม่คุ้มค่า เนื่องจากทุกแหล่งผลิตต้องติดตั้งระบบอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีราคาสูงและระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงมีต้นทุนสายส่งมากกว่าระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ดังนั้นในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะคุ้มค่ากว่าหากใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์แปลงแรงดันหรือคอนเวอร์เตอร์ เมื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสหรือเรกติไฟเออร์ (Rectifier) สามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงได้ เมื่อสุดระยะของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงต้องแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับปลายทาง [8] ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในยุคแรกใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิดคอมมิวเตทด้วยกระแสไลน์ (Line Commutated Converter : LCC) หรือที่เรียกกันว่า คอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Converter : CSC) ใช้เทคโนโลยีของไทรสเตอร์ (Thyristor) เมื่อนำคอนเวอร์เตอร์ชนิดคอมมิวเตทด้วยกระแสไลน์มาใช้กับระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงทำให้อุปกรณ์มีพิกัดกำลัง แรงดันและกระแสสูงมาก [9] การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนสามารถสร้างอุปกรณ์สวิตซ์ให้เปิดและปิดสวิตซ์ได้ตามความต้องการนั้นคือ ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) เทคโนโลยีของไอจีบีทีทำให้เกิดการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ชนิดใหม่เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Converter : VSC) [10] คอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีข้อดีกว่าคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสหลายอย่าง เช่น สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ [11-13] สถานีแปลงแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีขนาดเล็กกว่าสถานีแปลงแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสเพราะไม่ต้องมีลานไกและฟิลเตอร์มีขนาดเล็ก [14] เมื่อเปรียบเทียบโดยรวมแล้วพบว่า การควบคุมและเสถียรภาพของสถานีแปลงแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีประสิทธิภาพมากกว่าคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส [15-17] ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นการออกแบบระบบควบคุมสำหรับสถานีแปลงแบบคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพสูงยิ่งขึ้น [18-20] แต่ก็ยังมีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสอยู่เพราะยังมีหลายระบบที่ยังใช้งานอยู่ [20-21] นอกจากนี้ยังมีการนำตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy

Logic) มาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมอีกด้วย [22] และเพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นจึงมีการเชื่อมต่อแบบระบบหลายสถานี (Multi-terminal converter) ขึ้นมา

ต่อมา มีการนำระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาใช้งานเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อต้องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากด้วยระยะทางไกล กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งน้อยกว่าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงอย่างมาก [23] มีหลายงานวิจัยที่เสนอวิธีคำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งการคำนวณทั้งระบบมีความซับซ้อน จึงทำการคำนวณแยกส่วน เช่น ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสถานีแปลงแรงดันหรือคอนเวอร์เตอร์ [24-26] กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [26-29] มีการประมาณกำลังสูญเสียของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSC-HVDC) และได้จำลองระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงระยะสายส่ง 100 กิโลเมตร พิกัด  $\pm 150$  kV 350 MW พบว่ามีกำลังสูญเสียในสายส่งประมาณ 4.6 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสีย และระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงระยะสายส่ง 200 กิโลเมตร พิกัด  $\pm 300$  kV 1000 MW มีกำลังสูญเสียในสายส่งประมาณ 4.9 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสีย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาวสายและพิกัดกำลังส่งจ่ายเพิ่มขึ้น สัดส่วนกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [18] และยังมีการคำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โคโรนา (Corona phenomena) [30] จึงมีการวิจัยเพื่อหาวิธีที่ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เช่น การปรับปรุงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ [31] การปรับปรุงรูปแบบของการเชื่อมต่อสายส่ง [32]

นอกจากปัจจัยเรื่องกำลังสูญเสียแล้ว ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงถือเป็นสิ่งที่ละเลยไม่ได้ ต้องมีการพิจารณากระแสฮาร์มอนิกในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการใช้งานหลากหลายทำให้วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแตกต่างกัน สามารถใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ได้ [33]

ในการศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจำเป็นต้องเลือกใช้แบบจำลองสายส่งให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการวิเคราะห์ มีแบบจำลองหลายแบบที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย เช่น แบบจำลองสายส่งแบบพาย ( $\pi$ ) [34-35] แบบจำลองสายส่งแบบที (T) [36-37] และแบบจำลองสายส่งแบบเบอร์กรอน (Bergeron) [34-35] ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสายส่งแบบพายครอบคลุมการวิเคราะห์ที่ความถี่ไม่สูง [35] แต่เมื่อต้องการวิเคราะห์ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมต่อกับฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งในทะเล พบว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสายส่งแบบอเนกประสงค์ (Universal Line Model : ULM) มีความเหมาะสมกว่าแบบจำลองสายส่งแบบพาย [38] หรือแม้แต่วิเคราะห์ระบบที่ใช้สายเคเบิลใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้

น้ำก็ต้อเลือกแบบจำลองสายส่งให้เหมาะสมเช่นกัน [39-40] ซึ่งแต่ละงานวิจัยมีวิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายส่งที่แตกต่างกันไป [41]

การศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถศึกษาผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง PSCAD/EMTDC โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ CIGRE Benchmark ได้ ตัวอย่างการจำลองระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง  $\pm 500$  kV [42] พบว่าผลการจำลองมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ หรือการศึกษาระบบขนาดใหญ่ผ่านการจำลองสถานะชั่วคราวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม EMTDC (Electro Magnetic Transient in DC System : EMTDC) [43] และยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink [44-45] โปรแกรมจำลองเหล่านี้เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงสามารถนำระบบจริงมาทำการศึกษาหรือวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมจำลองได้ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบและควบคุมชุดปฏิบัติการต้นแบบของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาดเล็ก เพื่อศึกษาคุณลักษณะของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และพัฒนากระบวนการเพื่อเชื่อมต่อกับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้า [46] ซึ่งการสร้างชุดทดลองสำหรับเป็นกรณีศึกษาเรื่องระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในปัจจุบันยังมีอยู่น้อยมาก

ในประเทศไทยเองก็มีการวิจัยเกี่ยวกับระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยในงานวิจัยที่ [47] ศึกษาการเชื่อมต่อโครงข่ายสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของ EGAT-TNB โดยใช้โปรแกรม ATP ซึ่งศึกษาเรื่องเกี่ยวกับระบบตีบล็อกกิ้ง (Deblocking) ในการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และกรณีเกิดข้อผิดพลาดบนสายส่งลงดิน โดยนำผลลัพธ์จากโปรแกรม ATP มาเทียบกับค่าที่บันทึกจากการทดสอบจริง และในงานวิจัยที่ [48] อธิบายถึงการดำเนินการของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในประเทศไทย อีกทั้งกล่าวถึงการศึกษาาระบบกำลังไฟฟ้า และนำผลบันทึกจากระบบในแถบภาคใต้มาวิเคราะห์ปัญหา วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow) โดยใช้การจำลองแบบพลวัต เพื่อให้การทำงานของระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีเสถียรภาพมากขึ้น ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงข่ายในแถบภาคใต้ของประเทศไทยอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีอีกกรณีศึกษาที่แสดงถึงผลประโยชน์ในการเชื่อมต่อโครงข่ายในกลุ่มประเทศอาเซียนในโครงการ “ASEAN Power Grid” ในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีในปัจจุบัน และเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคต จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสนใจระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้การศึกษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถเรียนรู้ทั้งเชิงทฤษฎีและปฏิบัติไปพร้อมกัน กลุ่มผู้ศึกษาจึงได้พัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเพื่อการศึกษา การทดลอง การวิจัย การแก้ปัญหา สำหรับเตรียมพร้อมที่จะรับมือกับเทคโนโลยีระบบสายส่ง

ไฟฟ้ากระแสตรงที่กำลังพัฒนาและเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อประเทศไทยในอนาคต การศึกษาพัฒนาชุดทดลองนี้จึงไม่เพียงจะเกิดประโยชน์แก่ผู้ศึกษาเองเท่านั้น แต่ยังเป็นประโยชน์ต่อสังคมและประชาชนอีกด้วย

การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้ ทำการศึกษาการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง พารามิเตอร์ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ในสายส่งระบบไฟฟ้ากระแสตรง การใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ MATLAB Simulink ในการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อที่จะนำมาออกแบบเป็นชุดทดลองจริง จากนั้นทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมแรงดันและกระแสที่ได้จากชุดทดลองกับที่ได้จากการจำลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์ สายส่ง และโหลด
2. ศึกษาการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink
3. ออกแบบและพัฒนาเป็นชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
4. ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบแรงดัน กระแสและความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งที่ได้จากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ทำการออกแบบและจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 300 kV 300 MW ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink วิเคราะห์ผลจากการจำลองเพื่อนำไปออกแบบและสร้างชุดทดลองเป็นระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่พิกัด 500 V 750 W และ 450 V 750 W จากนั้นเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงดันและกระแสที่ได้จากชุดทดลองกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาองค์ความรู้และบทความของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและกำหนดขอบเขตการศึกษาของโครงการวิจัย
2. ศึกษาและจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink
3. วิเคราะห์ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อนำมาออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
4. ศึกษาองค์ความรู้และบทความเกี่ยวกับวงจรสมมูลและพารามิเตอร์ของสายส่ง เพื่อกำหนดค่าความต้าน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งที่ระยะต่าง ๆ
5. ออกแบบโครงสร้างชุดทดลองโดยใช้โปรแกรม Sketch Up และจัดทำโครงสร้างของชุดทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้
6. ออกแบบการทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลองกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยเปรียบเทียบแรงดันต้นทางและปลายทางของสายส่ง กระแสในสายส่ง และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง
7. ประกอบสร้างชุดทดลอง ทดสอบ และทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้
8. วิเคราะห์และประเมินผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลอง ปรับปรุงแก้ไขชุดทดลอง
9. สรุปผลการดำเนินโครงการงานวิจัย

#### 1.5 แผนการดำเนินงาน

เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559

1. สืบค้นงานวิจัยเกี่ยวกับระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ศึกษาทำความเข้าใจเทคโนโลยีปัจจุบัน และกำหนดขอบเขตงานวิจัย
2. ศึกษาแบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้โปรแกรม PSCAD

เดือนกันยายน พ.ศ. 2559

1. ทดลองสร้างแบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้โปรแกรม PSCAD แต่ไม่ประสบผลสำเร็จ
2. ศึกษาแบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink

3. ศึกษาตัวอย่างระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB Simulink

เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559

1. ออกแบบระบบสำหรับสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายส่งโดยอ้างอิงค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ได้สืบค้นในเบื้องต้น
3. คำนวณและออกแบบค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง โดยใช้ค่าที่มีขายตามท้องตลาด เพื่อประยุกต์ใช้กับสวิตช์ปรับเลือกค่า (Selector Switch) ได้ง่าย
4. จัดซื้อตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2559

1. ค้นหาแหล่งจำหน่ายเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ตามคุณสมบัติที่ต้องการ ติดต่อสั่งซื้อเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์
2. นำระบบที่ออกแบบมาจำลองผ่านระบบตัวอย่างในโปรแกรม MATLAB Simulink ปรับแก้ระบบที่ออกแบบให้มีพฤติกรรมการทำงานเหมือนระบบตัวอย่าง

เดือนธันวาคม พ.ศ. 2559

1. บริษัทรับทำเรกติไฟเออร์ติดต่อกลับว่าไม่สามารถทำเรกติไฟเออร์ตามที่ต้องการได้
2. ค้นหาแหล่งจำหน่ายเรกติไฟเออร์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

เดือนมกราคม พ.ศ. 2560

1. ได้รับอินเวอร์เตอร์ แต่พบปัญหาคือ อินเวอร์เตอร์ไม่ทำงานที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำกว่า 500 V จึงไม่สามารถปรับแรงดันตามที่ออกแบบการทดลองไว้ได้
2. นำอินเวอร์เตอร์ไปแก้ไขการทำงาน หลังจากแก้ไขอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ที่แรงดันตั้งแต่ 400 V ขึ้นไป ทำการออกแบบพิกัดแรงดันของสายส่งสำหรับชุดทดลองใหม่คือ 450 V และ 500 V
3. ออกแบบและคำนวณพารามิเตอร์สายส่งสำหรับชุดทดลองที่แรงดัน 450 V

เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

1. จัดซื้อตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน
2. ออกแบบโครงเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างของชุดทดลองโดยใช้โปรแกรม SketchUp
3. สร้างโครงสร้างชุดทดลอง ตามแบบ 2 มิติ และ 3 มิติที่ออกแบบไว้
4. สั่งซื้อตัวเหนี่ยวนำและจัดทำตัวเก็บประจุตามค่าที่ออกแบบไว้ให้เสร็จสมบูรณ์

เดือนมีนาคม พ.ศ. 2560

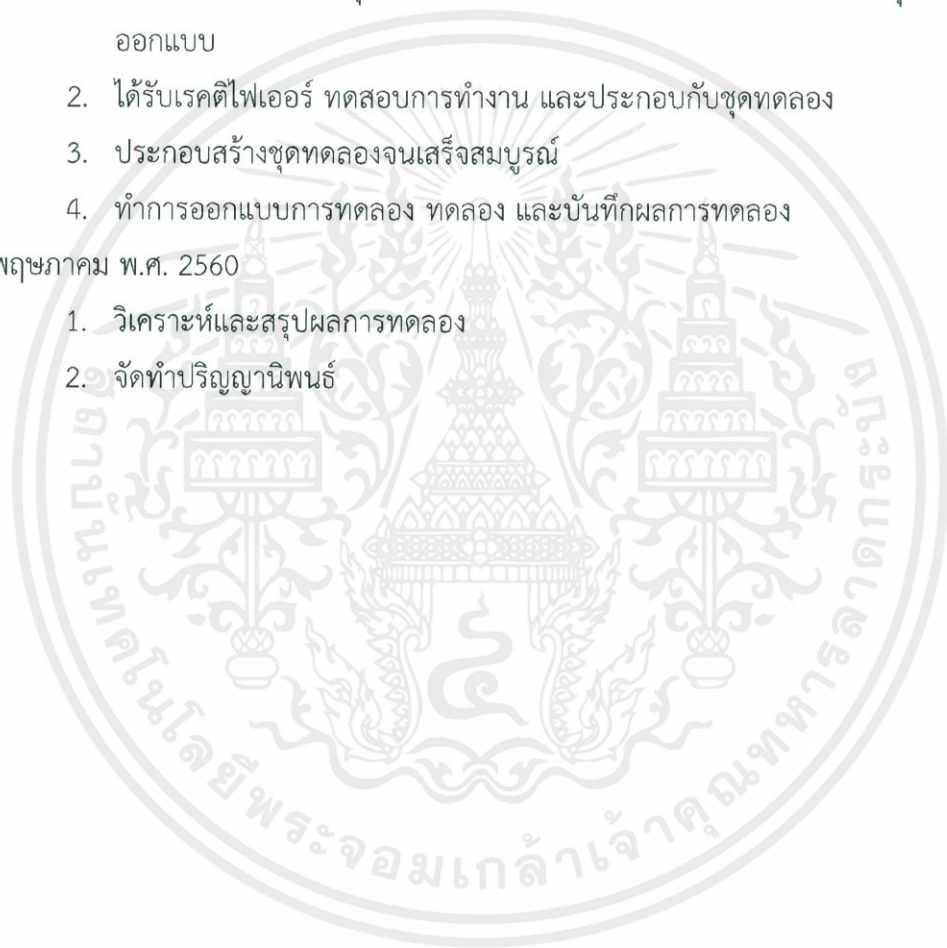
1. ได้รับการติดต่อกลับจากบริษัทรับทำเรคติไฟเออร์ถึงการปรับเปลี่ยนของขนาดเครื่อง
2. ปรับเปลี่ยนโครงสร้างและขนาดของชุดทดลอง แจ้งบริษัทรับทำโครงสร้างชุดทดลองถึงการเปลี่ยนแบบโครงสร้าง
3. จัดซื้อเบรกเกอร์และสวิตช์ปรับเลือกค่า

เดือนเมษายน พ.ศ. 2560

1. ได้รับโครงสร้างของชุดทดลอง ตัวเหนี่ยวนำ ทำการประกอบสร้างชุดทดลองตามที่ออกแบบ
2. ได้รับเรคติไฟเออร์ ทดสอบการทำงาน และประกอบกับชุดทดลอง
3. ประกอบสร้างชุดทดลองจนเสร็จสมบูรณ์
4. ทำการออกแบบการทดลอง ทดลอง และบันทึกผลการทดลอง

เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560

1. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
2. จัดทำปริญญานิพนธ์



ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานโครงการ

การดำเนินการ	ระยะเวลา																																																							
	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.				ก.พ.				มี.ค.				เม.ย.				พ.ค.																			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4																				
1. ศึกษาองค์ความรู้และงานวิจัยเกี่ยวกับระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง กำหนดขอบเขตการศึกษาของโครงการวิจัย	↕				- - - ↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕							
2. จัดตั้งระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
3. วิเคราะห์ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อนำมาออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
4. จัดทำรายการอุปกรณ์ที่ต้องใช้ และดำเนินการสั่งซื้ออุปกรณ์	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
5. ดำเนินการสร้างชุดทดลอง	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
6. ออกแบบการทดลอง และทำการทดลอง ด้วยชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
7. เปรียบเทียบผลการทดลองจากชุดทดลองกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ประเมินผลการทำงานของชุดทดลอง ปรับปรุงแก้ไขชุดทดลอง	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			
8. สรุปผลการดำเนินโครงการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์	↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕				↕			

↕ ระยะเวลาที่วางแผน      - - - ↕ ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.6.1 ประโยชน์เชิงวิศวกรรม

1. โครงการวิจัยนี้ สามารถเป็นต้นแบบหรือแนวทางให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูง
2. เพื่อสร้างเป็นชุดทดลองต้นแบบที่สามารถใช้ทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เช่น กำลังสูญเสีย แรงดันและกระแสในสายส่งที่ระยะต่างกัน และสามารถนำไปประยุกต์สำหรับกรณีศึกษาอื่น ๆ ของระบบสายส่งไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูงได้
3. ใช้เป็นชุดปฏิบัติการทดลองสำหรับการเรียนรู้ภาคปฏิบัติของระบบสายส่งไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูง

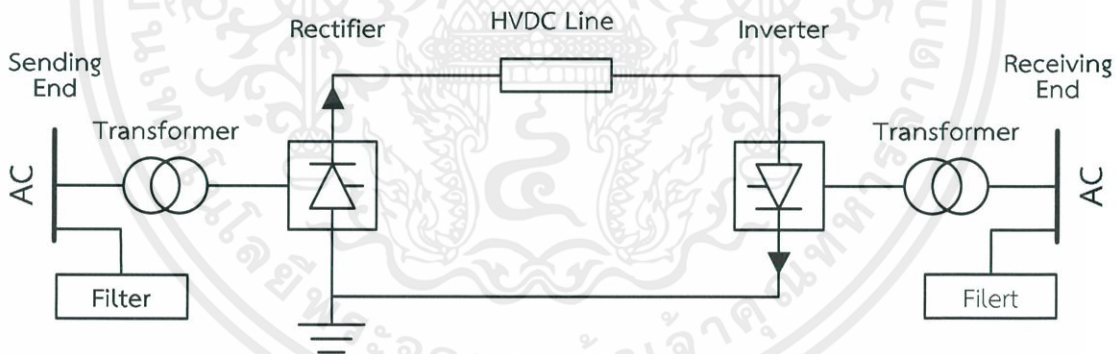
### 1.6.2 ประโยชน์เชิงอนุรักษ์พลังงาน

1. เพื่อผลักดันให้เกิดความสนใจและการพัฒนาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. เพื่อเป็นกรณีศึกษาสำหรับการลดกำลังสูญเสียสายระบบสายส่งสำหรับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระยะไกล
3. เป็นการศึกษาเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของพลังงานทดแทน สมาร์ทกริดที่จะเกิดขึ้นในอนาคต
4. กระตุ้นให้เกิดการสร้างแหล่งผลิตพลังงานทดแทน เช่น พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ ที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

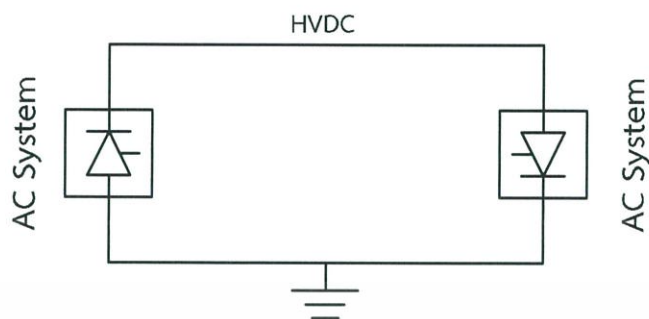
ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission Systems : HVDC Transmission Systems) คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง กระแสของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไหลในทิศทางเดียว ไม่มีความถี่ ข้อดีของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง คือ เมื่อส่งกำลังไฟฟ้าปริมาณมากที่ระยะทางไกลจะเกิดกำลังสูญเสียน้อย ใช้เชื่อมระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่างกันได้ และสามารถนำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง มาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงได้ แต่ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีข้อเสีย คือ ต้องการอุปกรณ์แปลงแรงดันที่สถานีต้นทางและปลายทางซึ่งมีราคาสูง โครงสร้างอย่างง่ายของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 2 โครงข่ายเข้าด้วยกัน ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้า เรกติไฟเออร์ อินเวอร์เตอร์ สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ตัวกรอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระบบสายส่งเอชวีดีซี

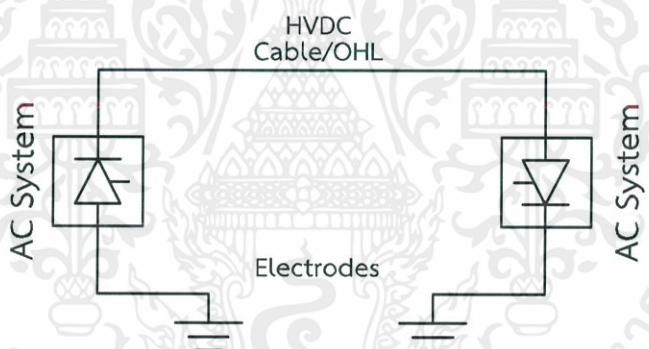
### 2.2 รูปแบบของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1. คอนเวอร์เตอร์คู่ (Dual Converter) หรือ แบคทูแบค (Back-to-Back Converter) คือ คอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานเป็นเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ติดตั้งอยู่ภายในสถานีเดียวกัน จุดประสงค์หลักใช้เพื่อส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่ซิงโครไนซ์กัน



รูปที่ 2.2 คอนเวอร์เตอร์แบบคทู่แบค (Back-to-Back Converter)

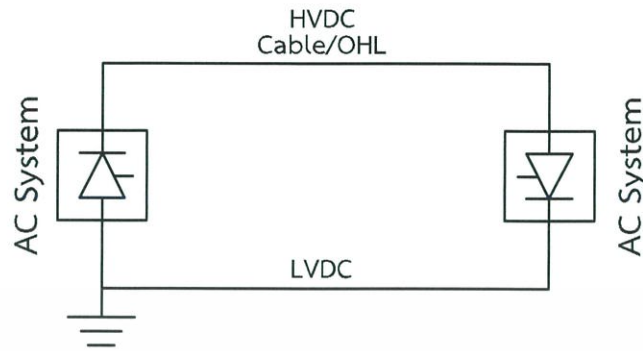
2. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบขั้วเดียว (Monopolar Long-distance Transmissions) ใช้สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระยะไกลมาก ๆ ในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลใต้ทะเลสามารถใช้ทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้า (Return Path) เป็นพื้นดินหรือทะเลได้ดังรูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียวมักจะสร้างไว้ขยายต่อเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว



รูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar)

มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดินหรือทะเล

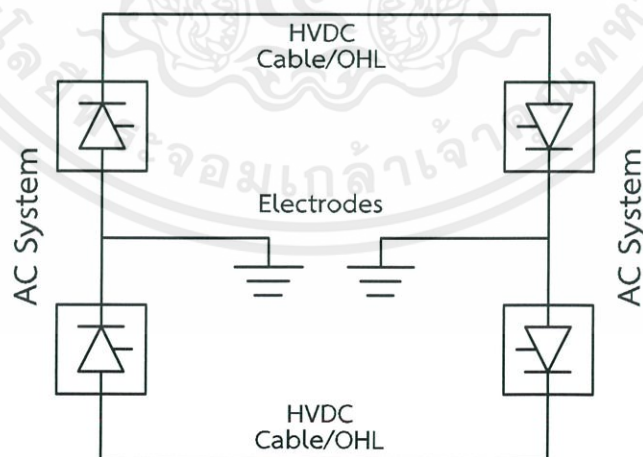
ในหลาย ๆ กรณีอาจมีขีดจำกัดในเรื่องโครงสร้างหรือสภาพแวดล้อม ทำให้ไม่สามารถใช้อิเล็กโทรดสำหรับทางเดินกลับเป็นพื้นดินหรือทะเลได้ จึงต้องใช้ทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะแทน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะ

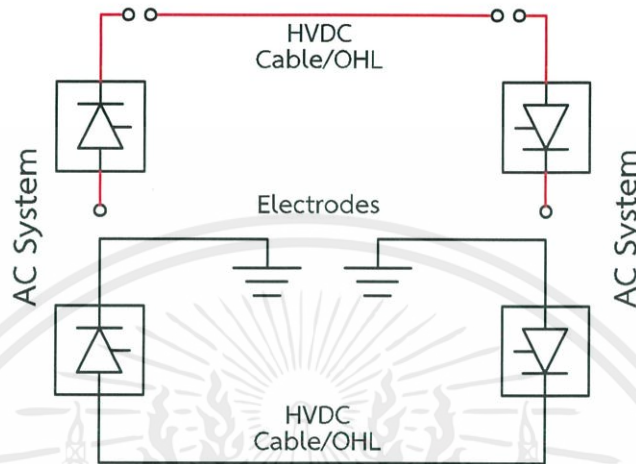
3. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้ว (Bipolar Long-distance Transmissions) คือ การส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้สองขั้วและมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Common Low Voltage Return Path) ร่วมกันในสภาวะการทำงานปกติ ทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้ามีกระแสไม่สมดุลแต่มีค่าน้อย ไหลอยู่ การส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้วจะใช้เมื่อต้องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก ซึ่งเกินขีดความสามารถของระบบขั้วเดียว ขณะที่มีการซ่อมบำรุงหรือเกิดความผิดพลาดในการทำงานที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ขั้วที่เหลือยังสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ระบบสองขั้วมี 3 ลักษณะ คือ

3.1. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้วมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดินหรือทะเล (Bipolar with Ground Return Path) ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว การใช้วงจรลักษณะนี้จะมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง ระบบมีความน่าเชื่อถือ



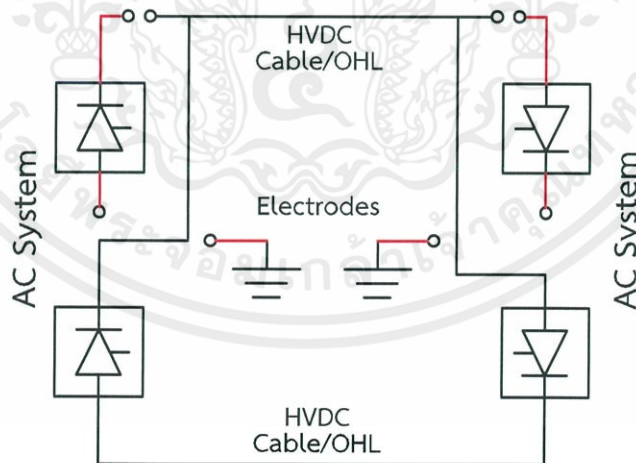
รูปที่ 2.5 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะทำงานในสภาวะปกติ

หากขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดความผิดพลาดในการทำงาน กระแสของขั้วที่ยังทำงานปกติจะไหลผ่านทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าที่เป็นพื้นดินหรือทะเลได้ ส่วนขั้วที่เสียหายก็จะถูกแยกออกจากระบบออกไป ดังรูปที่ 2.6



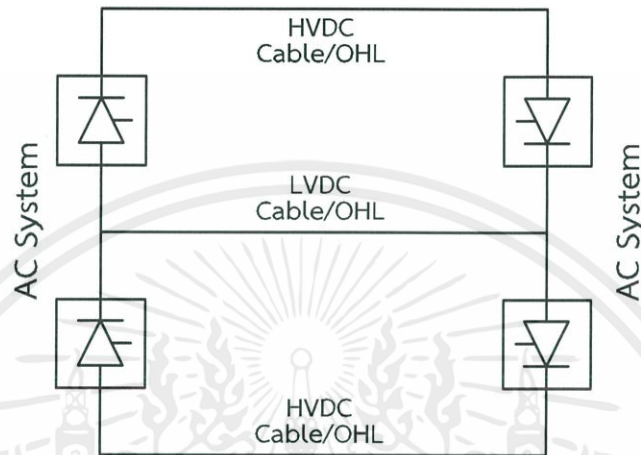
รูปที่ 2.6 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับขั้วใดขั้วหนึ่ง

สำหรับกรณีที่คอนเวอร์เตอร์เกิดความเสียหายทำให้ไม่สามารถใช้งานขั้วใดขั้วหนึ่งสามารถให้กระแสของอีกขั้วที่ยังทำงานอยู่ไหลกลับผ่านสายตัวนำของคอนเวอร์เตอร์ที่เสียหายได้ (แทนที่จะไหลกลับทางพื้นดินหรือทะเล) ดังรูปที่ 2.7



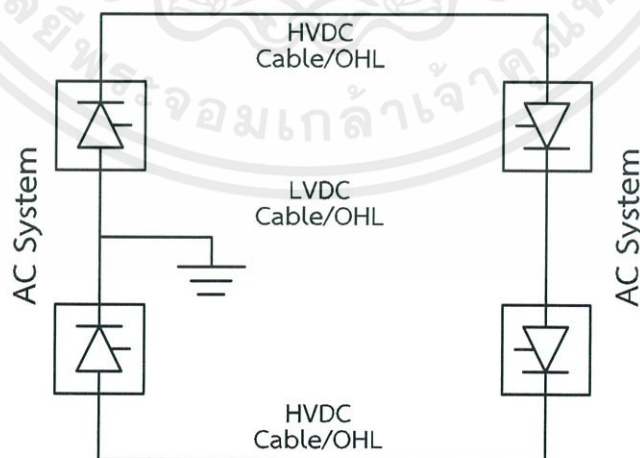
รูปที่ 2.7 ระบบส่งกำลังแบบขั้วคู่ (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับคอนเวอร์เตอร์

3.2. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบขั้วคู่ที่มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะและทำงานแบบขั้วเดียว (Bipolar with dedicated metallic ground return path for Monopolar operation) ในกรณีที่มีข้อจำกัดในการใช้อิเล็กโทรดหรือในกรณีที่ระยะทางในการส่งมีระยะสั้น สามารถใช้สายตัวนำกระแสตรงแรงดันต่ำเป็นทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะและทำงานแบบขั้วเดียว (Monopolar)

3.3. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้วที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าโดยทำงานแบบขั้วเดียว (Bipolar without dedicated return path for Monopolar operation) การใช้ระบบสองขั้วให้ทำงานในลักษณะขั้วเดียว สามารถตัดอิเล็กโทรดหรือทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าที่เป็นโลหะได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนเริ่มต้นของระบบนี้มีค่าต่ำที่สุด



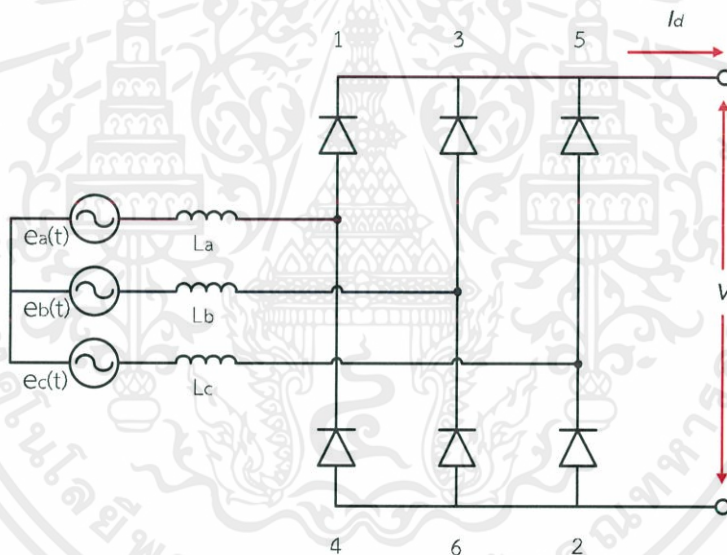
รูปที่ 2.9 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) ที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าและทำงานแบบขั้วเดียว (Monopolar)

สามารถให้ระบบสองขั้วทำงานแบบระบบขั้วเดียวได้โดยการใช้สวิตช์บายพาส (Bypass) ขั้วของคอนเวอร์เตอร์ออกไป แต่ไม่สามารถทำได้หากสายตัวนำเอชวีดีซีนั้นมีปัญหา (เพราะใช้เป็นทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้า)

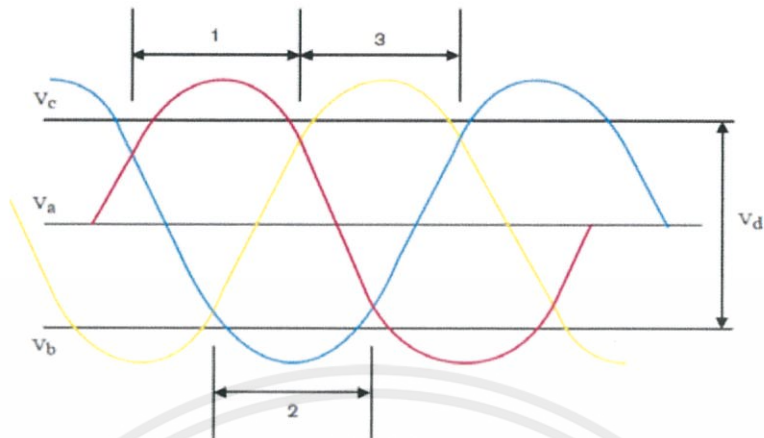
### 2.3 คอนเวอร์เตอร์(Converter)

#### 1. คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด (Six-pulse diode converter bridge)

คอนเวอร์เตอร์สามเฟสใช้เรียงกระแสระบบไฟฟ้าสามเฟส คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดนี้ใช้ไดโอดต่อเป็นวงจรดังรูป 2.10 ไดโอดจะสลับกันนำกระแส 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ไดโอดแต่ละตัวนำกระแส 120 องศา ทุก ๆ หนึ่งคาบ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ไดโอดจะนำกระแสเป็นคู่ ๆ ได้แก่ (6,1) (1,2) (2,3) (3,4) (4,5) และ (5,6) การนำกระแสของไดโอดเป็นไปตามรูปที่ 2.11



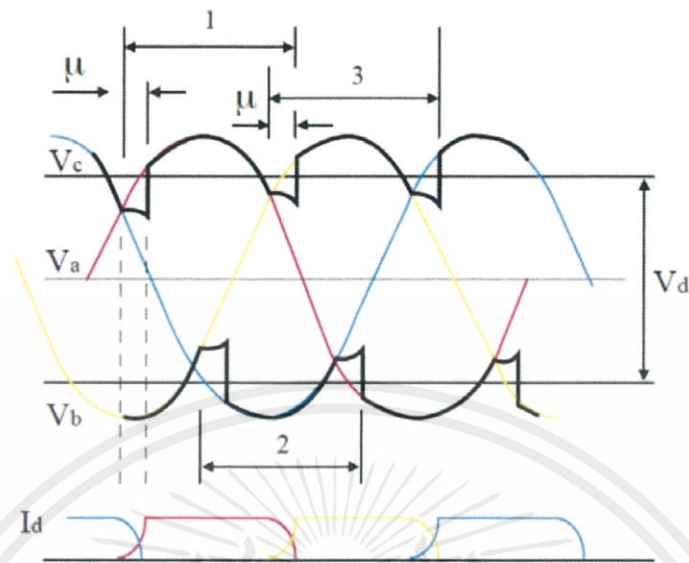
รูปที่ 2.10 คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด



รูปที่ 2.11 ลำดับการนำกระแสของไดโอด

จากรูปที่ 2.11 สมมุติไดโอด 1 และ ไดโอด 2 กำลังทำงานและมีกระแสไหลผ่าน เมื่อเวลาผ่านไปแรงดัน  $V_{bc}$  จะมากกว่าแรงดัน  $V_{ac}$  ทำให้ไดโอด 3 เริ่มนำกระแส กระแสที่ไหลอยู่จะไหลผ่าน ไดโอด 3 แทนไดโอด 1 กระบวนการนี้เรียกว่า การคอมมิวเตชัน (Commutation)

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลไม่สามารถลดลงได้ทันทีเนื่องจากผลของความต้านทานจลนภาพของการคอมมิวเตชัน (ความต้านทานจลนภาพของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ไทริสเตอร์ หรือ วงจรกรองความถี่สูง) ทำให้เกิดการการทำงานทับซ้อนหรือโอเวอร์แลป (Overlap) ในขณะนำกระแส เช่น เกิดโอเวอร์แลประหว่างไดโอด 1 กับ ไดโอด 3 รูปที่ 2.12 ซึ่งเห็นว่าแรงดันกระแสตรง ( $V_d$ ) ลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 2.11 ในรูปที่ 2.12 แสดงรูปคลื่นกระแสระหว่างเกิดการคอมมิวเตชัน เมื่อเวลาผ่านไป กระแสที่ไหลผ่านไดโอดกำลังลด ขณะเดียวกันไดโอดที่จะทำงานในลำดับถัดไปก็เริ่มนำกระแส ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลอยู่จากไดโอดหนึ่งไปยังอีกไดโอดหนึ่งเรียกว่า มุมโอเวอร์แลป (Overlap angle) หรือ  $\mu$



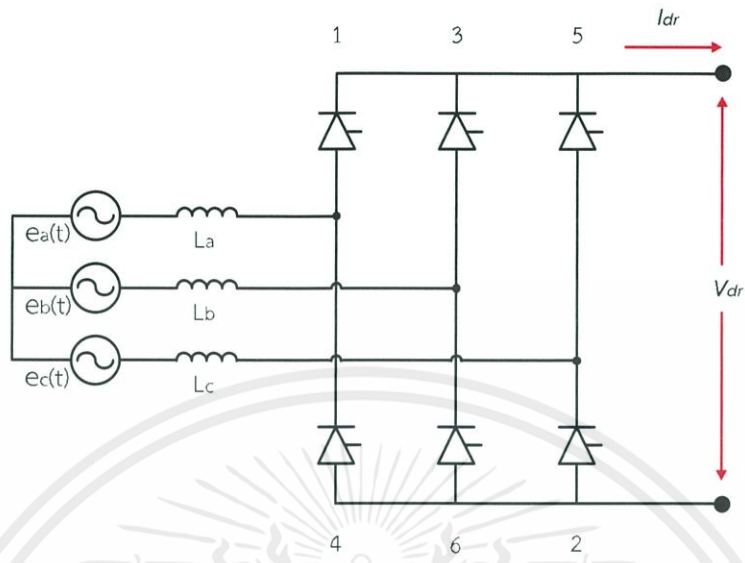
รูปที่ 2.12 การคอมมิวเตชันขณะคอนเวอร์เตอร์ทำงาน

## 2. คอนเวอร์เตอร์ควบคุมได้ (Controlled Converter)

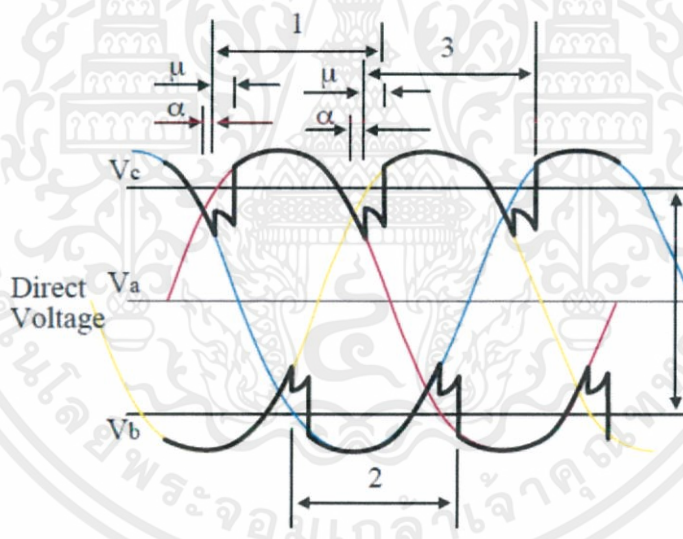
ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับแปลงกระแสไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่ 2 ด้านของสายส่ง ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวคือ คอนเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการทำงาน 2 รูปแบบ คือ คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter) หรือ เรกติไฟเออร์ (Rectifier) และคอนเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

### 2.1. เรกติไฟเออร์ (Rectifier)

โดยทั่วไปแล้วคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถควบคุมเฟสได้แสดงดังรูป 2.13 ไทริสเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นวาล์วของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวาล์วจะไม่ทำงานจนกว่าจะมีสัญญาณมาที่ขาเกต กระบวนการแปลงแรงดันเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติไฟเออร์สามารถหน่วงเวลาได้ด้วยมุมหน่วงนำกระแสไฟฟ้าหรือมุมจุดชนวน (Firing angle :  $\alpha$ ) จากรูปที่ 2.14 มุมจุดชนวนจะเป็นช่วงเวลาที่วาล์วถูกไบอัสไปหน้าจนถึงเวลาที่เริ่มการคอมมิวเตชัน

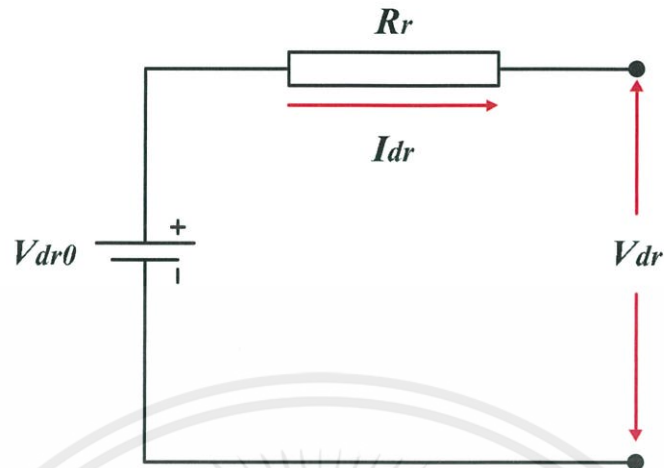


รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติไฟเออร์



รูปที่ 2.14 คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมจุดชนวน  $\alpha$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของเรกติไฟเออร์

เมื่อ  $e_a(t)$   $e_b(t)$  และ  $e_c(t)$  เป็นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สมดุล วงจรสมมูลของเรกติไฟเออร์แสดงดังรูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกกับมุมจุดชนวนคือ

$$V_{dr0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ar}(t) \cos \alpha \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_{ar}(t)$  คือ แรงดันไลน์ที่เข้าเรกติไฟเออร์ และค่าความต้านทานสมมูลภายใน คือ

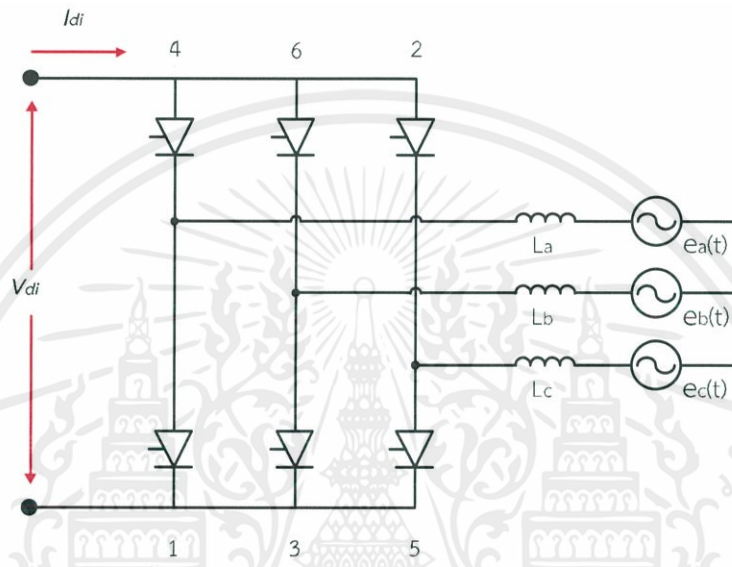
$$R_r = \frac{3}{\pi} x_r \quad (2.2)$$

เมื่อ  $x_r$  คือ ความต้านทานจลิตภาพคอมมิวเตชันของเรกติไฟเออร์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของเรกติไฟเออร์ คือ

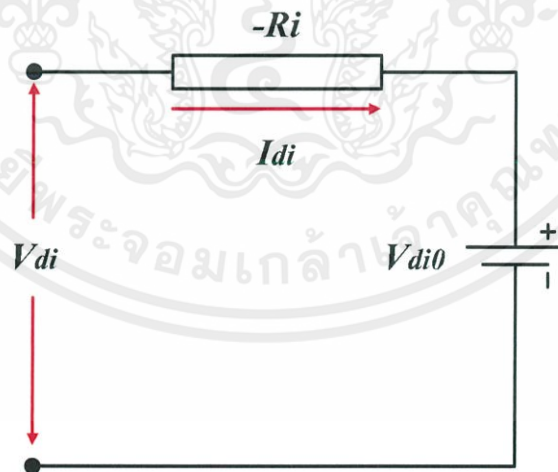
$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ar}(t) \cos \alpha - \frac{3}{\pi} x_r \quad (2.3)$$

## 2.2. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในทำนองเดียวกัน คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งมีวงจรและการทำงานที่คล้ายกับเรกติไฟเออร์ดังรูปที่ 2.16 เมื่อเพิ่มมุมจุดชววนเกิน 90 องศาคอนเวอร์เตอร์จะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ โดยปกติใช้มุมหยุดนำกระแสหรือมุมดับชววน (Extinction angle :  $\gamma$ ) กับอินเวอร์เตอร์ วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้ากับมุมดับชนวน คือ

$$V_{ai0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ai}(t) \cos \gamma \quad (2.4)$$

เมื่อ  $V_{ai}(t)$  คือ แรงดันไลน์ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ และมุมหยุดนำกระแส ( $\gamma$ ) คือ

$$\gamma = 180^\circ - \mu - \alpha \quad (2.5)$$

ค่าความต้านทานสมมูลภายใน คือ

$$R_i = \frac{3}{\pi} x_i \quad (2.6)$$

เมื่อ  $x_i$  คือ ความต้านทานจลิตภาพคอมมิวเตชันของอินเวอร์เตอร์  
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาของอินเวอร์เตอร์ คือ

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ai}(t) \cos \gamma - \frac{3}{\pi} x_i \quad (2.7)$$

## 2.4 ตัวกรองไฟฟ้า

### 1. ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Filter)

หลักการออกแบบตัวกรอง คือ กำจัดกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นและการรบกวนจากสัญญาณรบกวน ตัวกรองที่มีประสิทธิภาพนั้นอิมพีแดนซ์ของตัวกรองต้องมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และในระบบอุดมคตินั้นอิมพีแดนซ์ตัวกรองต้องไม่เกิดการเรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2. จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter)

โครงการระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสมัยใหม่นิยมใช้จูนฟิลเตอร์แบบขนาน (Shunt-harmonic) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยอิมพีแดนซ์ของจูนฟิลเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$Z_f = R + j \left[ \omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad (2.8)$$

ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีเพียงค่าความต้านทานส่วนจริงเท่านั้น โดยช่วงการกรองของตัวกรองจะถูกกำหนดขอบเขตด้วยความถี่ สมการคุณลักษณะของตัวกรองแสดงได้ดังนี้

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_n \quad (2.9)$$

เมื่อ  $f_n$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{L/C} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $X_0$  คือ ค่าความต้านทานของความเหนี่ยวนำหรือค่าความต้านทานของความจุไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ตัวประกอบคุณภาพ ( $Q$ ) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\omega_n}{PB} \quad (2.11)$$

$$C = 1/(\omega_n RQ) \quad (2.12)$$

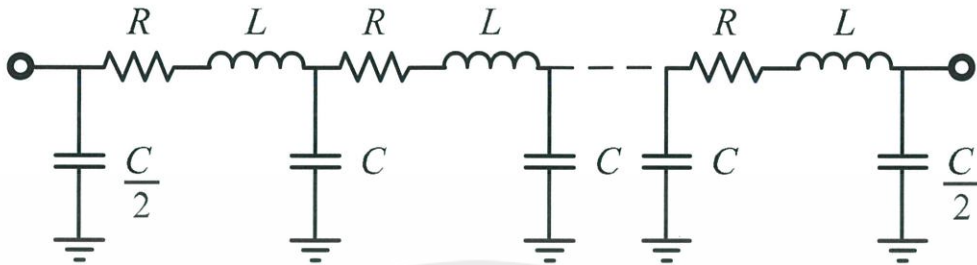
$$L = RQ / \omega_n \quad (2.13)$$

เมื่อ  $PB$  คือ ช่วงความถี่ที่กรอง หน่วยเป็น  $rad / s$

### 3. ตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรง

ด้านไฟฟ้ากระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สัมพันธ์กัน เช่น มุมจุดชนวน มุมดับชนวน และมุมโอเวอร์แลปกับอิมพีแดนซ์ของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรงมีคุณสมบัติ คือไม่มีกำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน จึงมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน มีเพียงฟังก์ชันช่วยลดฮาร์มอนิก

## 2.5 พารามิเตอร์สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลพาย ( $\pi$ ) ของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

สำหรับวงจรสมมูลพาย ( $\pi$ ) พารามิเตอร์ความต้านทาน ความนำไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวความยาวของสายส่ง แบบจำลองของสายส่งได้มาจากการนำพารามิเตอร์วงจรสมมูลพาย ( $\pi$ ) หลายวงจรมาต่อกันดังแสดงตามรูปที่ 2.18

- เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทานของสายส่ง มีหน่วยเป็น  $\Omega/\text{km}$   
 $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง มีหน่วยเป็น  $\text{H}/\text{km}$   
 $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายส่ง มีหน่วยเป็น  $\text{F}/\text{km}$

## 2.6 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการศึกษาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพของแบบจำลองระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งในระบบไฟฟ้ากระแสตรงต้องพิจารณาทั้งแบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์ สายส่งกระแสตรง ระบบควบคุมไฟฟ้ากระแสตรง และช่วงการเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับ จากสมการของคอนเวอร์เตอร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังนี้

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{ac} \quad (2.14)$$

$$V_d = V_{d0} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_c I_d B \quad (2.15)$$

หรือ

$$V_d = V_{d0} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} X_c I_d B \quad (2.16)$$

$$\phi \approx \cos^{-1} \theta (V_d / V_{d0}) \quad (2.17)$$

$$P = V_d I_d = P_{ac} \quad (2.18)$$

$$Q = P \tan \phi \quad (2.19)$$

เมื่อ	$E_{ac}$	=	ค่าราคากำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไลน์ที่เอชทีบัส (HT Bus)
	$T$	=	อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง
	$B$	=	จำนวนวงจรบริดจ์ที่ต่ออนุกรมกัน
	$P$	=	กำลังไฟฟ้าจริง
	$Q$	=	กำลังไฟฟ้าเสมือน
	$X_c$	=	ความต้านทานจินตภาพคอมมิวเตชันต่อวงจรบริดจ์
	$V_d, I_d$	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสต่อขั้ว

สมการด้านบนที่ใช้ในการคำนวณหามุมส่วนประกอบกำลัง (Power factor angle :  $\phi$ )

เป็นการหาค่าโดยประมาณ และสำหรับสมการของสายส่งกระแสตรงสามารถเขียนได้ในรูปของความต้านทาน  $R_L$  ได้ตามสมการที่ 2.23

$$V_{dr} = V_{dl} + R_L I_d \quad (2.20)$$

## 2.7 ระบบเปอร์ยูนิท (Per-Unit System)

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ที่อยู่บนพิกัดต่างกันมาเชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกัน จึงมีการนำระบบเปอร์ยูนิท (Per-Unit System) เข้ามาช่วยเพื่อทำให้อยู่บนฐานเดียวกัน คำนวณง่ายขึ้น โดยค่าปริมาณต่างๆสามารถคำนวณให้อยู่ในค่าของเปอร์ยูนิทได้ดังนี้

$$\text{Per unit value} = \frac{\text{Actual Value}}{\text{Base value}} \quad (2.21)$$

ค่าจริง (Actual value) สามารถเป็นได้ทั้งปริมาณเฟสเซอร์ (Phasor) หรือจำนวนเชิงซ้อน ส่วนค่าฐาน (Base value) จะเป็นจำนวนจริงเสมอ โดยที่ต้องทราบค่าฐานของปริมาณอย่างน้อยสองค่า เพื่อที่จะนำไปหาค่าฐานที่เหลือได้ โดยค่าฐานของกระแสจะหาได้จากสมการที่ 2.25 และค่าฐานของแรงดันไฟฟ้าจะหาได้จากสมการที่ 2.26

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} \quad (2.22)$$

$$Z_B = \frac{V_B / \sqrt{3}}{I_B} = \frac{(V_B)^2}{S_B} \quad (2.23)$$

ซึ่งปริมาณต่าง ๆ ในระบบเปอร์ยูนิตสามารถหาจากสูตรข้างต้นได้เช่นกัน โดยกำลังปรากฏและแรงดันไฟฟ้าในระบบเปอร์ยูนิตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.27 และ สมการที่ 2.28 ตามลำดับ

$$S_{pu} = V_{pu} I_{pu}^* \quad (2.24)$$

$$V_{pu} = Z_{pu} I_{pu} \quad (2.25)$$

อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงแต่ละเครื่องนั้นบางครั้งจะอยู่ในระบบเปอร์ยูนิตที่มีค่าฐานที่พิกัดของตัวเอง จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตของอิมพีแดนซ์จากระบบหนึ่งให้อยู่ในค่าฐานของอีกระบบหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \left( \frac{V_B^{old}}{V_B^{new}} \right)^2 \quad (2.26)$$

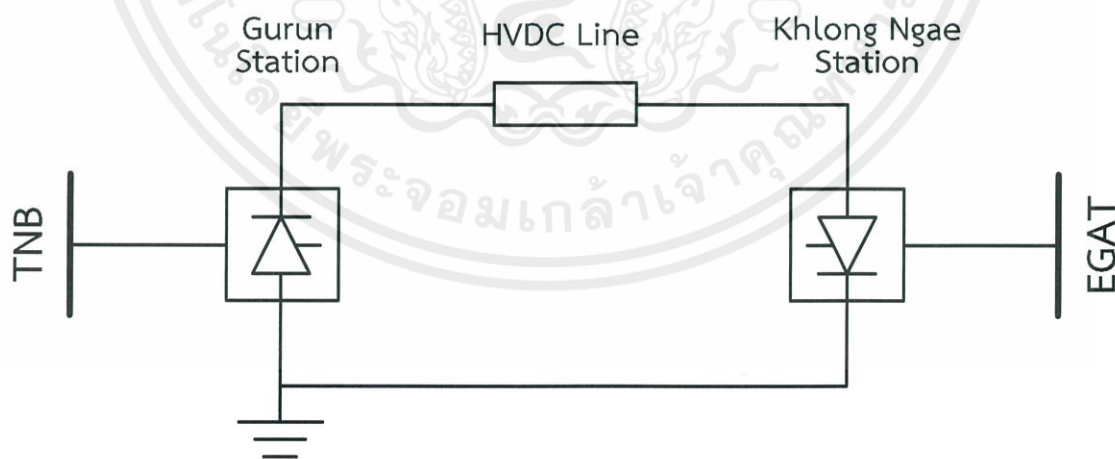
### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

โครงการนี้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจริงที่นำมาศึกษาและจำลองเป็นระบบที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้า Gurun ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (TNB) และสถานีไฟฟ้าคลองแวงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระบบสายส่งมีพิกัด 300 kV 300 MW สามารถให้โหลดเกินได้ถึง 450 MW ในเวลาไม่เกิน 10 นาที ระยะสายส่ง 110 กิโลเมตร (ประมาณ 24 กิโลเมตรบนพื้นที่ของประเทศไทยและ 86 กิโลเมตรบนพื้นที่ของประเทศมาเลเซีย) โดยส่งกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้า Gurun มายังสถานีไฟฟ้าคลองแวงทำการจำลองโดยอ้างอิงจากระบบจริง เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง พิกัดแรงดัน และพิกัดกำลัง และศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ เช่น กำลังสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง พิกัดแรงดัน หรือกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่าย

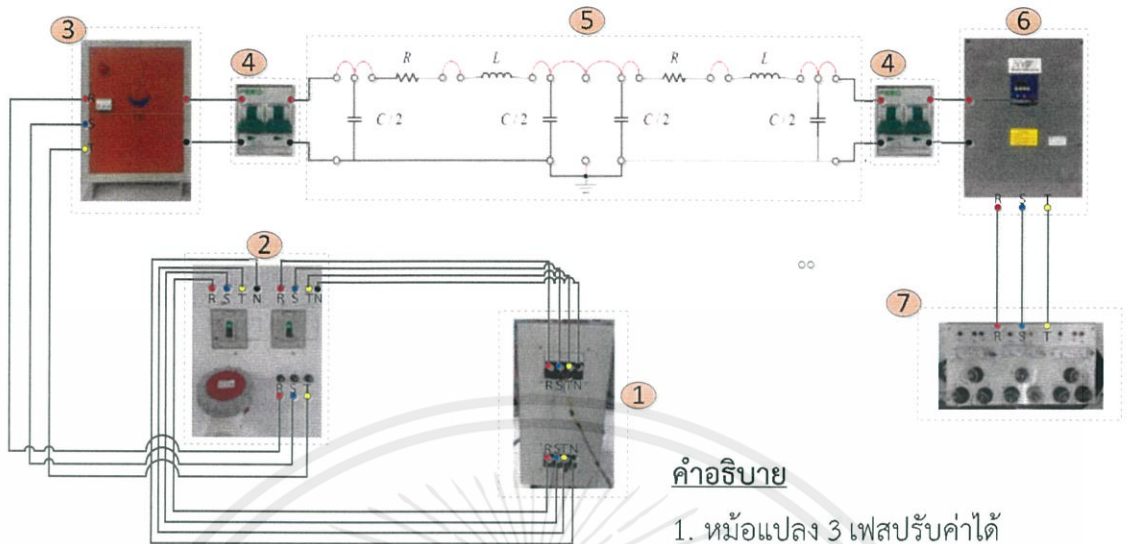
#### 3.1 การออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

โครงสร้างของระบบที่นำมาศึกษาเป็นระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะ ภาพรวมของระบบที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

แนวคิดการออกแบบเบื้องต้นจากรูปที่ 3.1 ให้ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าแห่งชาติ มาเลเซียเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดทดลองส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงเข้าสู่ สถานีไฟฟ้า Gurun ซึ่งเป็นสถานีแปลงแรงดันในชุดทดลองกำหนดให้เป็นเรกติไฟเออร์ สถานี Gurun จะส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 300 kV 300 MW ในชุดทดลอง กำหนดให้เป็นแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงวงจรสมมูลพาย ( $\pi$ -Equivalent Circuit) กำลังไฟฟ้าถูกส่งไปสถานีไฟฟ้าคลองแจะในชุดทดลองกำหนดให้เป็นอินเวอร์เตอร์ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูงที่ถูกแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจะถูกส่งเข้าระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทยซึ่งในระบบจำลองกำหนดให้เป็นโหลด ระบบจำลองที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่ง ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ โดยเริ่มจากจ่ายไฟฟ้าเข้ามาที่หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้ (หมายเลข 1) เพื่อใช้ในการเพิ่มและลดแรงดันไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่จ่ายเข้ามาสู่ชุด ทดลองนั้นมีอุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง (หมายเลข 2) อยู่ก่อนเข้าสู่เรกติไฟเออร์ 3 เฟสเพื่อแปลงไฟฟ้า จากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายไฟเข้าสู่ระบบจำลองสายส่ง (หมายเลข 5) โดยทั้งต้นทาง และปลายทางของระบบจำลองสายนั้นมีเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกันไฟฟ้ากระแสตรง (หมายเลข 4) ป้องกันคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 เครื่องอยู่ จากนั้นที่ปลายสายส่งต้องทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้า กระแสสลับก่อนจ่ายไฟให้โหลด (หมายเลข 7) โดยใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (หมายเลข 6)



### คำอธิบาย

1. หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้
2. อุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง
3. เรคตีไฟเออร์ 3 เฟส
4. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกันไฟฟ้ากระแสตรง
5. ระบบจำลองสายส่ง
6. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
7. โหลด

รูปที่ 3.2 แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง

### 1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

โครงการวิจัยนี้ทดลองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 V นำมาเชื่อมต่อกับหม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เรกติไฟเออร์ได้ตามความต้องการ

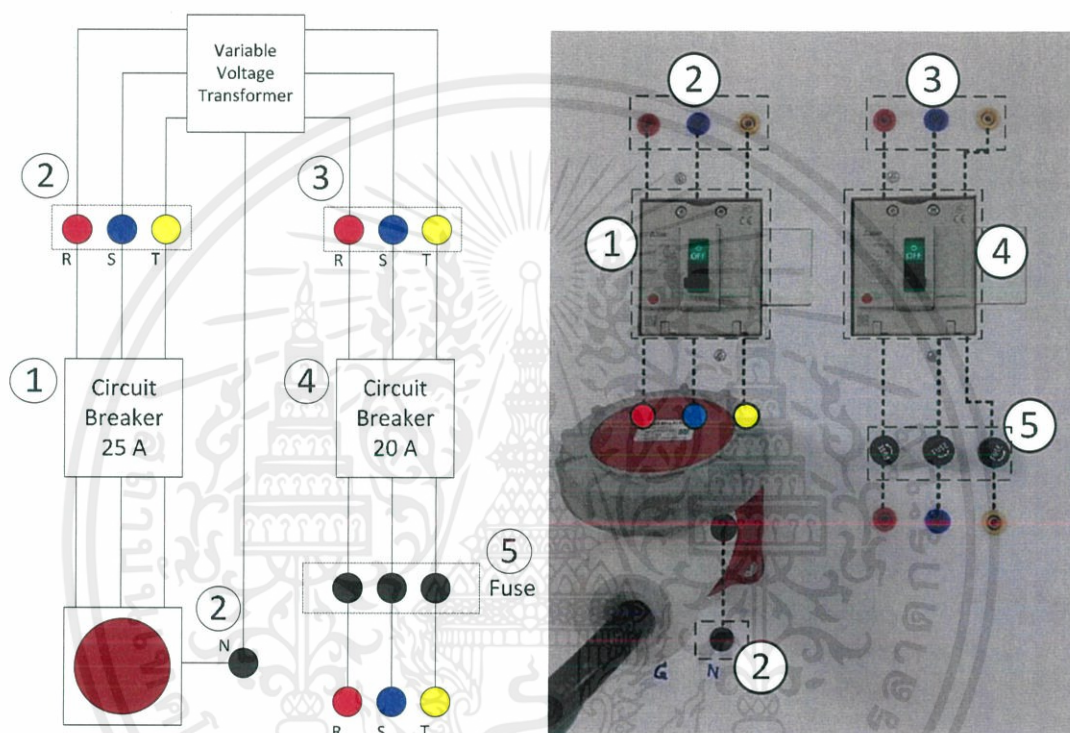


รูปที่ 3.3 หม้อแปลงสามเฟสปรับค่าได้พิกัด 30A 0 - 420 Vac

### 2. อุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง

ในชุดทดลองของโครงการวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ป้องกัน 2 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และ ฟิวส์ โดยใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ในการป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลอง หากเกิดความผิดพลาดขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จะตัดวงจรเพื่อป้องกันกระแสเกินที่อาจทำให้ชุดทดลองเสียหาย และจะใช้ฟิวส์ในการป้องกันกระแสเกิน หากขณะทดลองมีกระแสเข้าสู่ระบบมากเกินไปจนอาจทำให้อุปกรณ์เสียหาย ฟิวส์จะทำการป้องกันวงจรโดยหลอมละลาย และปลดวงจรนั้นออกจากระบบจนกว่าจะเปลี่ยนฟิวส์ที่ขาดออกแล้วนำตัวใหม่ใส่เข้าไปแทนที่ การเลือกขนาดฟิวส์นั้นอาจจะสามารถเปลี่ยนได้ตามลักษณะการทดลองหากโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3.4 การป้องกันใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ (หมายเลข 1) ทำหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดในการทดลองที่อาจเกิดขึ้นในชุดทดลองโดยเบรกเกอร์ตัวนี้ติดตั้งระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสปรับค่าได้ด้านปฐมภูมิ (หมายเลข 2) ส่วนเซอร์กิตเบรกเกอร์ (หมายเลข 4) และฟิวส์ (หมายเลข 5) จะทำหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสปรับค่าได้ด้านทุติยภูมิ (หมายเลข 3)



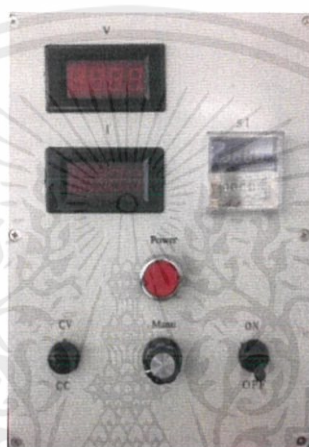
รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันชุดทดลอง

### 3. คอนเวอร์เตอร์

สถานีไฟฟ้า Gurun ทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงของประเทศมาเลเซียให้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อส่งเข้าสายส่ง ในชุดทดลองจึงกำหนดให้สถานีไฟฟ้า Gurun เป็นเรกติไฟเออร์ 3 เฟส ส่วนสถานีไฟฟ้าคลองแวงทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่รับมาจากสายส่งให้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจ่ายเข้าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงในประเทศไทย ในชุดทดลองจึงกำหนดให้สถานีไฟฟ้าคลองแวงเป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



(ก) เรกติไฟเออร์ 3 เฟส



(ข) รีโมตควบคุมเรกติไฟเออร์

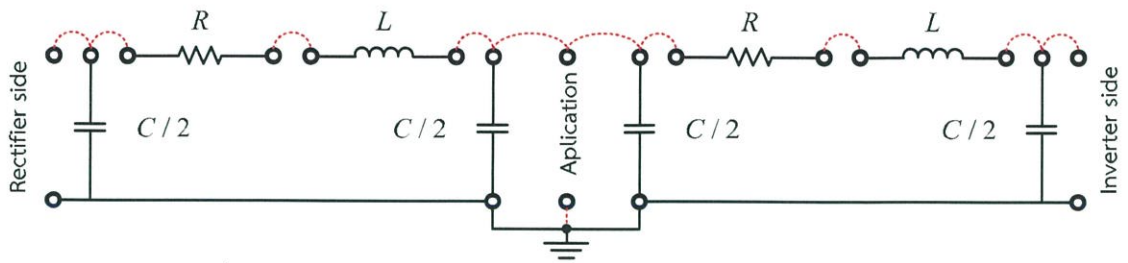


(ค) อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

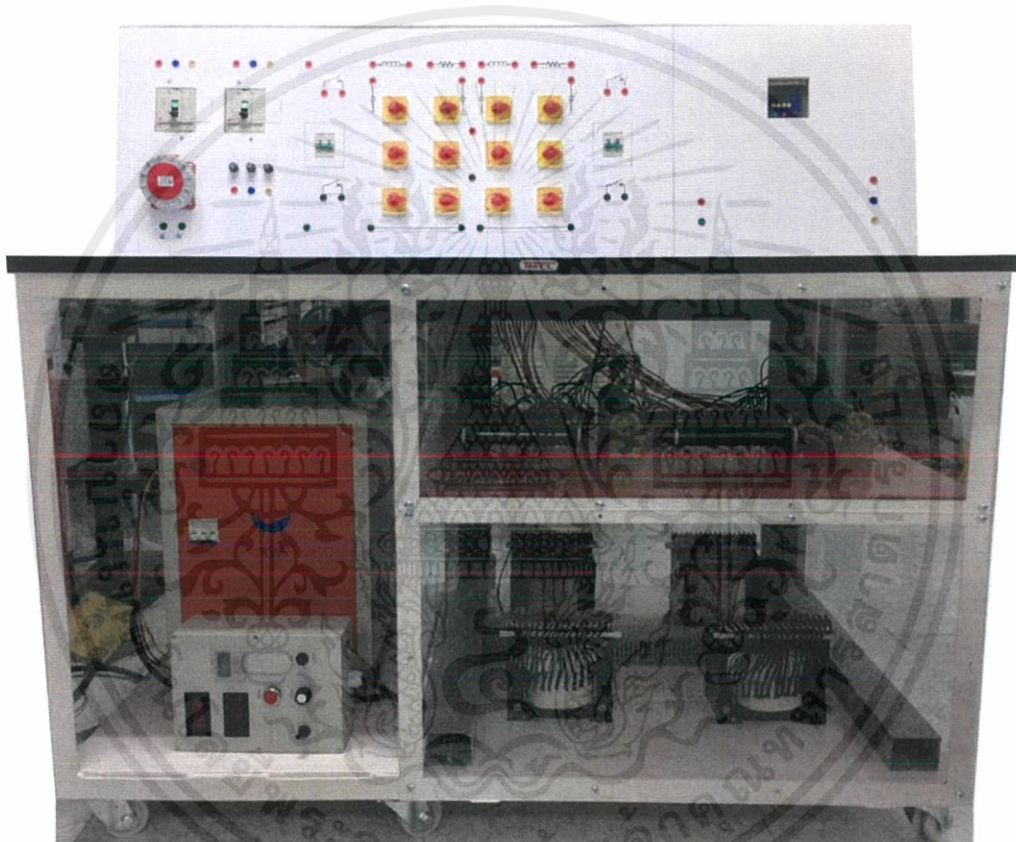
รูปที่ 3.5 คอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดัน

### 4. แบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

โครงการวิศวกรรมนี้ทำการจำลองสายส่งของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 150 - 600 กิโลเมตรโดยใช้วงจรสมมูลพาย การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ ความต้านทานไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า ของแบบจำลองใช้วิธีการเทียบอัตราส่วนเปอร์ยูนิตจากค่าพารามิเตอร์สายส่งระบบจริง วงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงประกอบด้วยวงจรสมมูลพาย 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 3.6 ต้นทางของวงจรสายส่งเชื่อมต่อกับเรกติไฟเออร์ที่จำลองเป็นสถานีไฟฟ้า Gurun และปลายทางของวงจรสายส่งเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ที่จำลองเป็นสถานีไฟฟ้าคลองแวงและออกแบบให้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายส่งตามสัดส่วนระยะทางได้

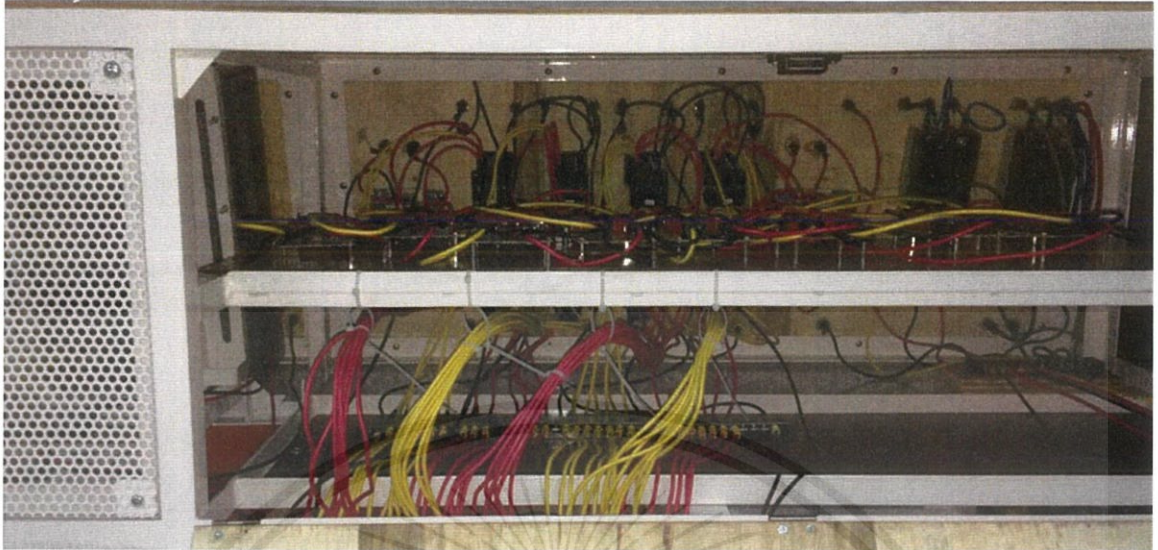


รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง



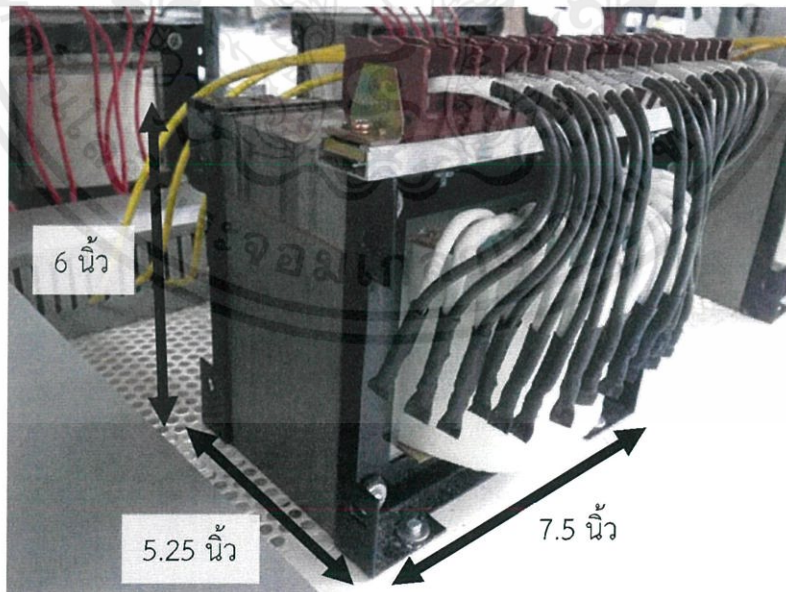
รูปที่ 3.7 ด้านหน้าชุดทดลองระบบสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ด้านหลังชุดทดลองระบบสายส่ง

5. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ 4 ตัว ใช้ในวงจรสมมูลพายวงจระละ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทุกตัวมีขนาดสูงสุด 205 mH มีพิกัดกระแส 12 A ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เลือกใช้แบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.1 (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข)

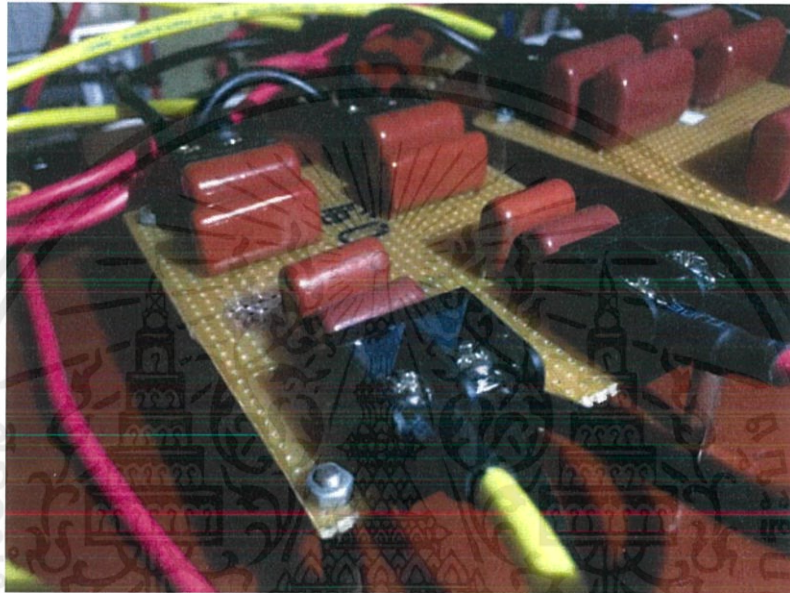


รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาวสาย ส่ง (km)	% ของความ ยาวสายส่งที่ วัดจากด้านส่ง (%)	ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (mH)		
			คำนวณ	ใช้ในระบบ จำลอง	ใช้ในระบบจริง
450	150	25	26.73	27	29.7
		50	53.46	53	59.4
		75	80.19	80	89.1
	300	25	53.46	53	59.4
		50	106.92	107	118.8
		75	160.38	160	178.2
	600	25	106.92	107	118.8
		50	213.84	214	237.6
		75	320.76	320	356.4
500	150	25	33.00	30	29.7
		50	66.00	65	59.4
		75	99.00	100	89.1
	300	25	66.00	65	59.4
		50	132.00	130	118.8
		75	198.00	195	178.2
	600	25	132.00	130	118.8
		50	264.00	260	237.6
		75	396.00	395	356.4

6. การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองนี้ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลเวอร์ไมก้า (Silver Mica) ซึ่งผลิตออกมาหลายค่าความจุไฟฟ้าและมีพิคัดแรงดันสูง นำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่อขนานกัน เพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามต้องการ ค่าความจุไฟฟ้าที่เลือกใช้แบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข)



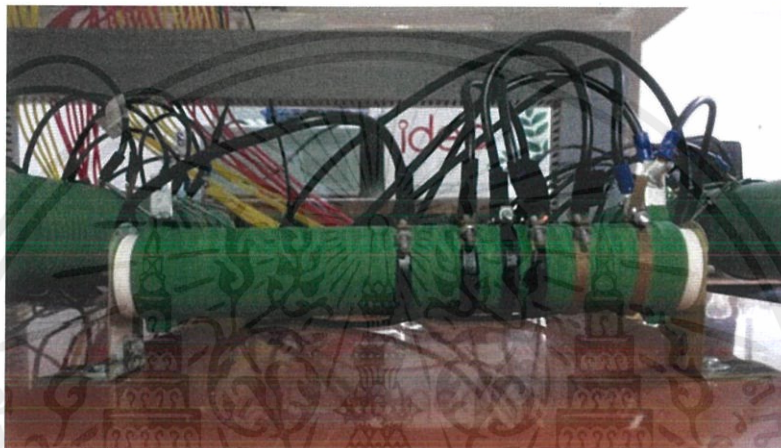
รูปที่ 3.10 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลเวอร์ไมก้า

ตารางที่ 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

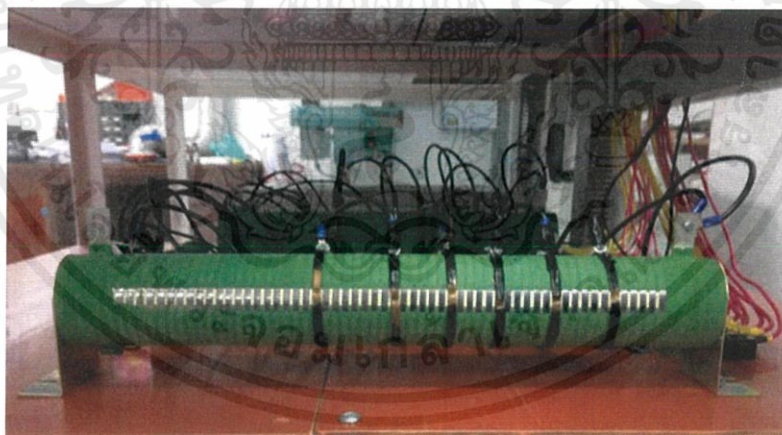
ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาวสาย ส่ง (km)	% ของความ ยาวสายส่งที่ วัดจากด้านส่ง (%)	ความจุไฟฟ้า ( $\mu\text{F}$ )		
			คำนวณ	ใช้ในระบบ จำลอง	ใช้ในระบบจริง
450	150	25	0.30	0.30	2.7
		50	0.600	0.60	5.4
		75	0.900	0.90	8.1
	300	25	0.600	0.60	5.4
		50	1.200	1.20	10.8
		75	1.800	1.80	16.2
	600	25	1.200	1.20	10.8
		50	2.400	2.40	21.6
		75	3.600	3.60	32.4
500	150	25	0.243	0.27	2.7
		50	0.486	0.49	5.4
		75	0.729	0.80	8.1
	300	25	0.486	0.49	5.4
		50	0.972	1.00	10.8
		75	1.458	1.50	16.2
	600	25	0.972	1.00	10.8
		50	1.944	2.00	21.6
		75	2.916	3.00	32.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การออกแบบตัวต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองนี้ใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์ (Wire Wound) แบบปรับค่าได้ โดยมีตัวต้านทาน 1  $\Omega$  จำนวน 2 ตัว พิกัดกำลังตัวเลข 200 W และตัวต้านทาน 10  $\Omega$  จำนวน 2 ตัว พิกัดกำลังตัวเลข 1000 W ใช้ในวงจรสมมูลพายวงจระ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เลือกใช้แบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.11 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดกำลัง 200 W



รูปที่ 3.12 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดกำลัง 1000 W

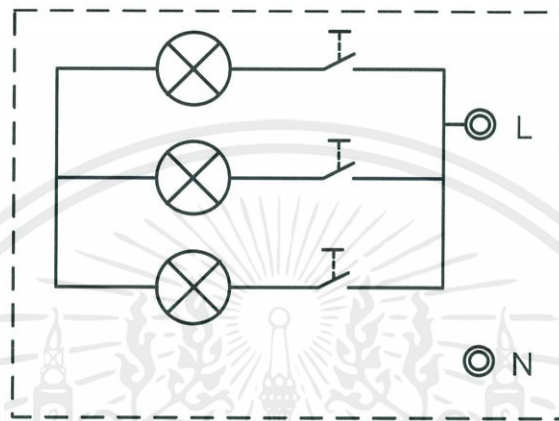
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

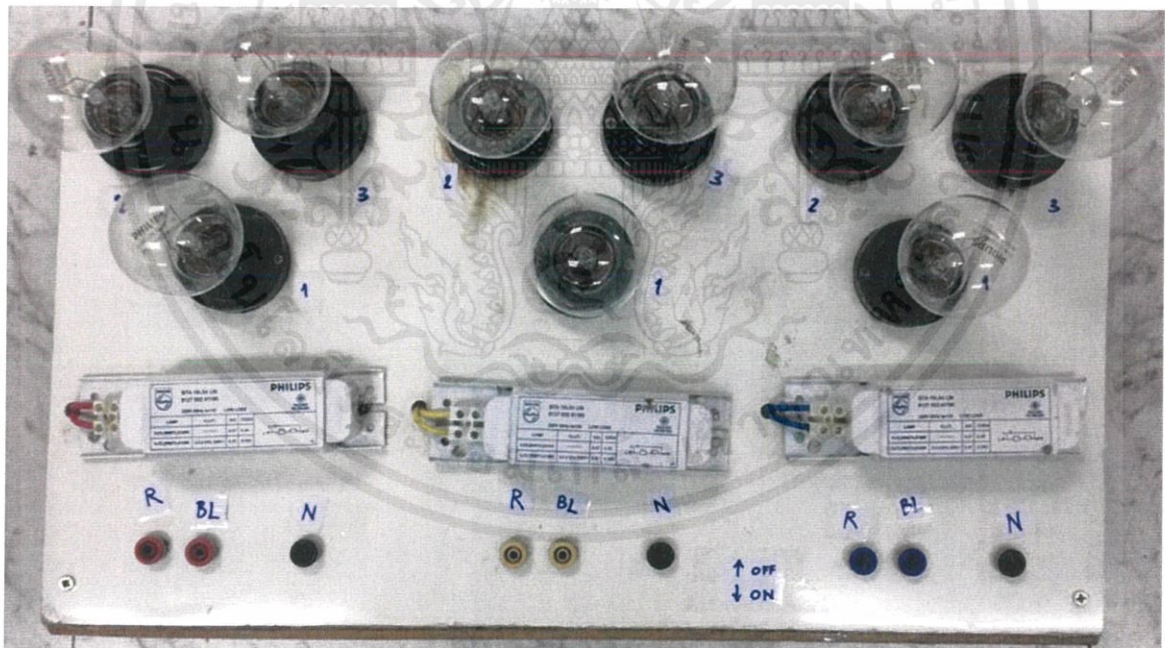
ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาวสาย ส่ง (km)	% ของความ ยาวสายส่งที่ วัดจากด้านส่ง (%)	ความต้านทาน ( $\Omega$ )		
			คำนวณ	ใช้ในระบบ จำลอง	ใช้ในระบบจริง
450	150	25	0.506	0.50	0.562
		50	1.012	1.00	1.125
		75	1.519	1.50	1.688
	300	25	1.012	1.00	1.125
		50	2.025	2.00	2.250
		75	3.038	3.00	3.375
	600	25	2.025	2.00	2.250
		50	4.050	4.00	4.500
		75	6.075	6.00	6.750
500	150	25	0.625	0.62	0.562
		50	1.250	1.25	1.125
		75	1.875	1.88	1.688
	300	25	1.250	1.25	1.125
		50	2.500	2.50	2.250
		75	3.750	3.75	3.375
	600	25	2.500	2.50	2.250
		50	5.000	5.00	4.500
		75	7.500	7.50	6.750

### 8. โหลดของระบบ

สถานีไฟฟ้าคลองแวงรับกำลังไฟฟ้าจากสถานี Gurun จึงกำหนดให้ระบบไฟฟ้ากำลัง กระแสสลับแรงดันสูงที่รับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าคลองแวงเปรียบเสมือนโหลดของระบบจำลอง โหลดที่ใช้ทดลอง คือ โหลดตัวต้านทานใช้หลอดไส้ 250 W ต่อเฟสดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรของโหลดแต่ละเฟสที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.14 โหลดของชุดทดลองระบบสายส่ง

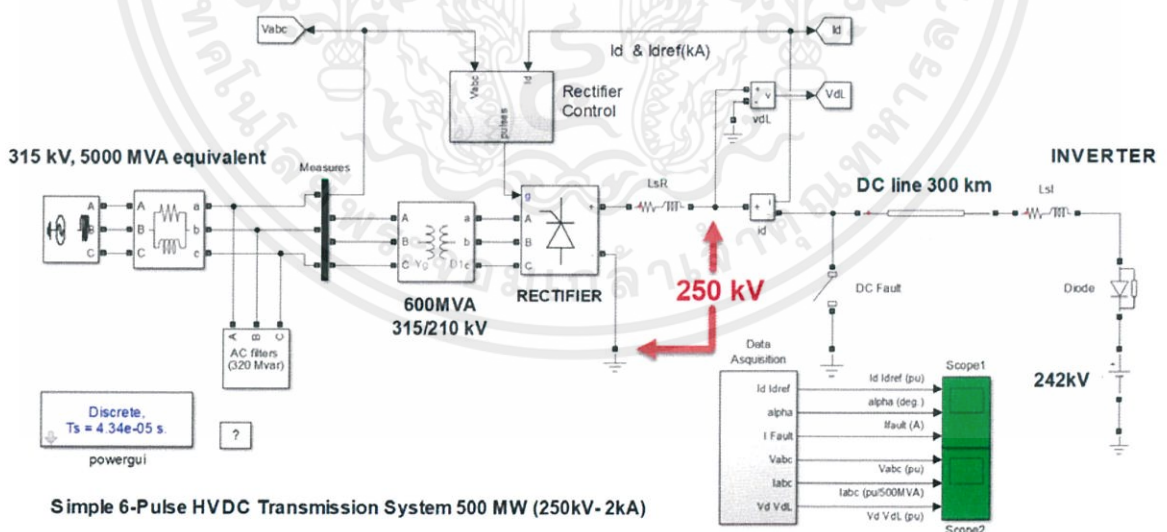
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

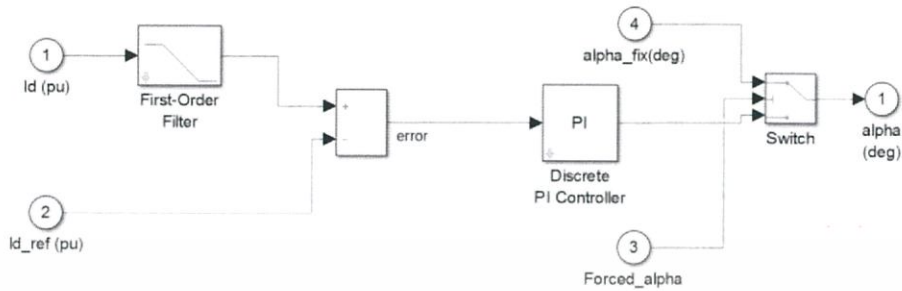
ก่อนประกอบสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จำเป็นต้องจำลองระบบที่ออกแบบผ่านโปรแกรมจำลองมาก่อน นำผลการจำลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับมาตรฐานหรืองานวิจัยอ้างอิงอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่ออกแบบและยืนยันความน่าเชื่อถือ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ จำลองเพื่อตรวจสอบว่าระบบจำลองที่ออกแบบเชื่อถือได้ และจำลองระบบที่ออกแบบสำหรับการสร้างชุดทดลอง

#### 1. การจำลองระบบตัวอย่างระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW

ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสายส่งที่ออกแบบ โดยนำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบมาจำลองผ่านระบบตัวอย่างระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW) เป็นตัวอย่างการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 250 kV 500 MW ที่มีโปรแกรม MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.15 โดยเรคตีไฟเออร์ใช้ทรินสเตอร์เป็น อุปกรณ์สวิตชิงและใช้ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ (Current Regulator PI) ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นระบบย่อย (Subsystem) อยู่ภายในระบบควบคุมเรคตีไฟเออร์ (Rectifier Control) ทำหน้าที่ควบคุมมุมจุดชนวน (Alpha) เพื่อให้กระแสในสายส่งมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 3.15 ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV - 2kA)



รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมภายในระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ

นำระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบไว้จำลองผ่านระบบตัวอย่างโดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองของระบบที่ออกแบบกับระบบตัวอย่าง โดยสังเกตจากพฤติกรรมของแรงดันที่ต้นทางสายส่ง กระแสในสายส่ง และมุมจุดชนวน

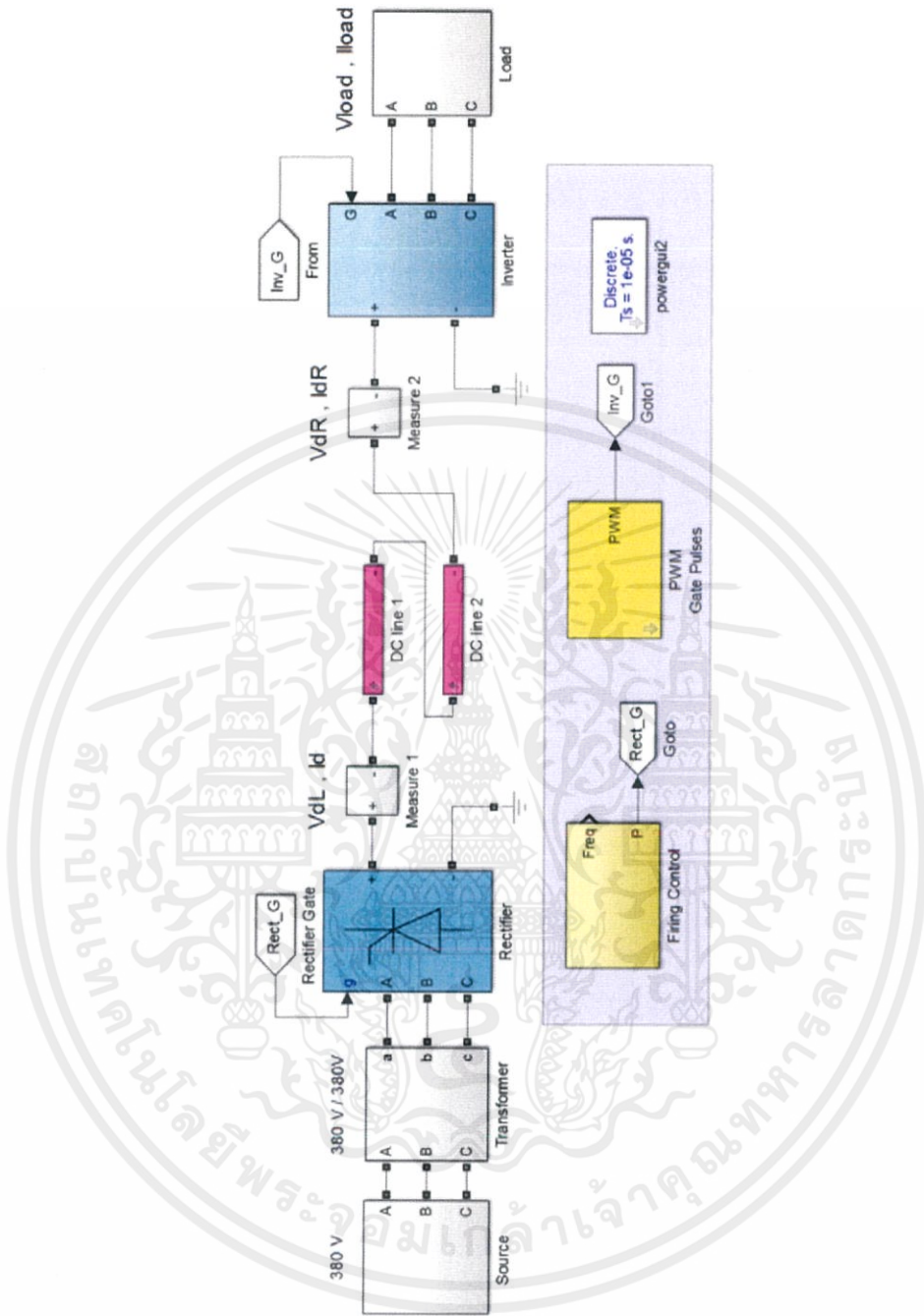
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบข้อมูลของระบบตัวอย่างและระบบที่ออกแบบ

พารามิเตอร์	ระบบตัวอย่าง	ระบบ 450 V	ระบบ 500 V
พิกัดแรงดัน (kV)	250	0.45	0.50
พิกัดกำลัง (kW)	500000	0.75	0.75
พิกัดกระแส (A)	2000	1.667	1.500
ความต้านทานสายส่ง ( $\Omega/\text{km}$ )	0.0150	0.0135	0.0167
ความเหนี่ยวนำสายส่ง (mH/km)	0.7920	0.7128	0.8800
ความจุไฟฟ้าสายส่ง (nF/km)	14.40	16.00	12.96
แรงดันโครงข่ายกระแสสลับ (kV)	210	0.380	0.380
แรงดันวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ (kV)	242	0.437	0.484

## 2. การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ขั้นตอนนี้เป็น การนำระบบที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1 โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 3.4 มาสร้างเป็นระบบจำลอง 2 ระบบ คือ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 450 V 750 W และระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 500 V 750 W มีส่วนประกอบหลักของระบบได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เรคตีไฟเออร์ สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ และโหลด ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ทำการสร้างเป็นระบบย่อย (Subsystem) เพื่อความสะดวกต่อการสร้างและการแก้ไขแบบจำลอง แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.17 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

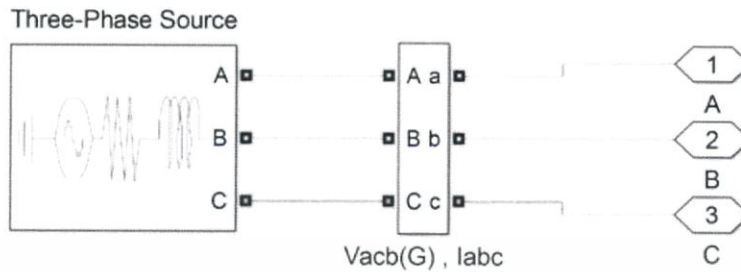




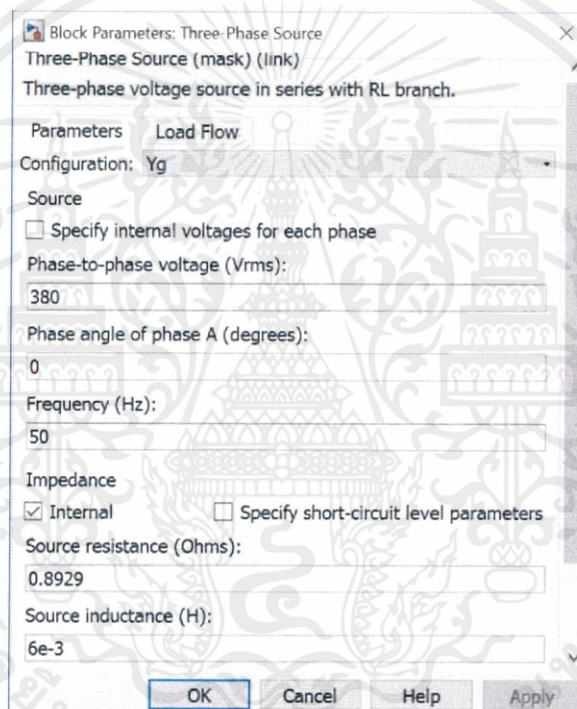
รูปที่ 3.17 แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบจำลองแทนด้วยระบบย่อยของแหล่งจ่ายโดยไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.18 ประกอบด้วยเครื่องมือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (Three-Phase Source) แสดงรายละเอียดการตั้งค่าดังรูปที่ 3.19 และเครื่องมือวัด V-I สามเฟส (Three-Phase V-I Measurement) เป็นอุปกรณ์วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

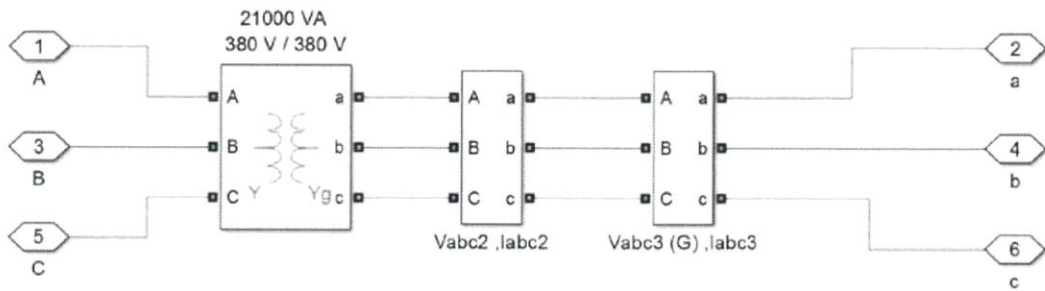


รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของแหล่งจ่าย

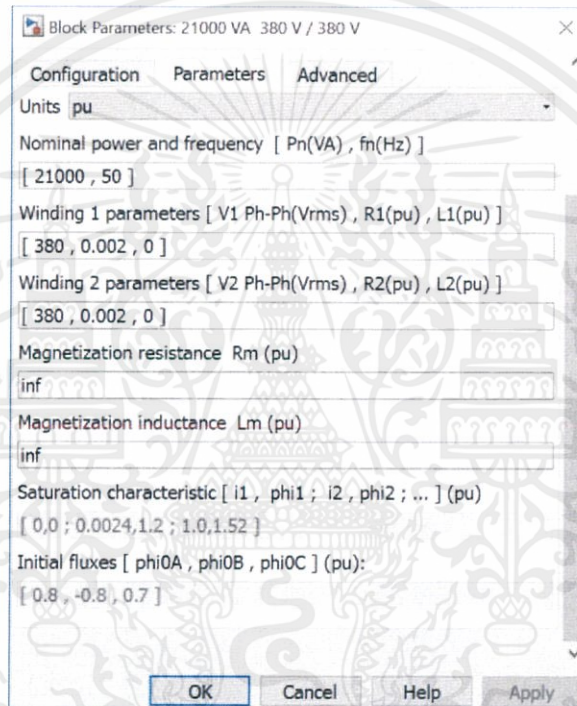


รูปที่ 3.19 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจำลองแทนด้วยระบบย่อยของหม้อแปลงโดยไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.20 ประกอบด้วยเครื่องมือหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด (Three-Phase Transformer Two Winding) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ แสดงรายละเอียดการตั้งค่าดังรูปที่ 3.21 และเครื่องมือวัด V-I สามเฟส (Three-Phase V-I Measurement) เป็นอุปกรณ์วัด



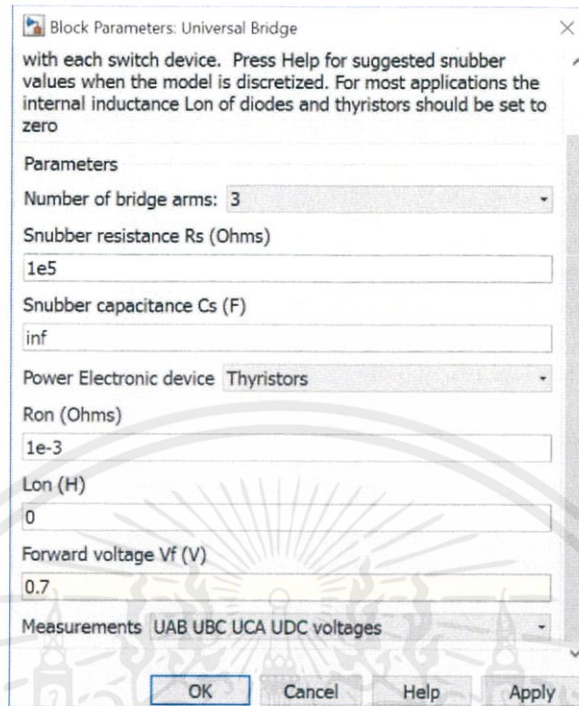
รูปที่ 3.20 ไดอะแกรมภายในของระบบย่อยของหม้อแปลง



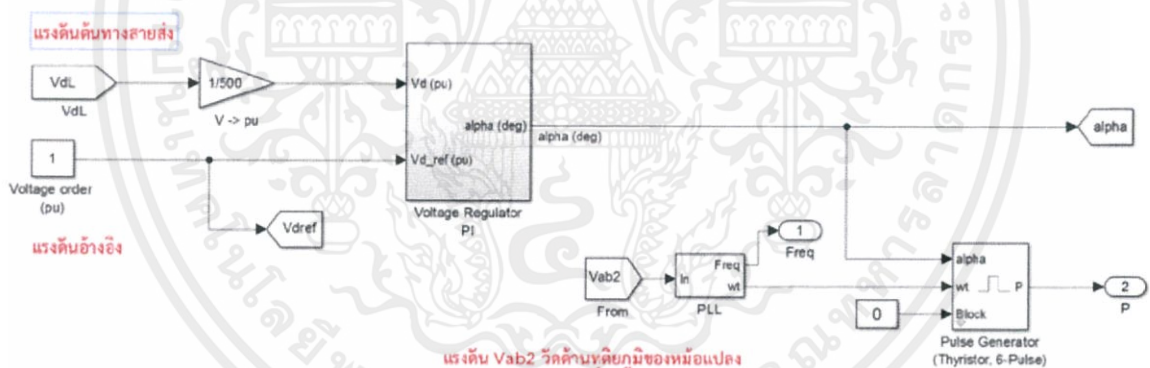
รูปที่ 3.21 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด

เรคตีไฟเออร์ของระบบจำลองใช้เครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์ (Universal Bridge) แสดงรายละเอียดการตั้งค่าดังรูปที่ 3.22 ควบคุมการทำงานด้วยระบบย่อยของตัวควบคุมมุมจุดชนวน (Firing Controller) ไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.23 ประกอบไปด้วย ระบบย่อยควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบพีไอ (Voltage Regulator PI) ใช้ระบบควบคุมชนิดพีไอ (PI) ควบคุมมุมจุดชนวนที่ทำให้แรงดันต้นทางของสายส่ง ( $V_d$ ) มีค่าตามแรงดันอ้างอิงที่กำหนด ( $V_{d\_ref}$ ) และเครื่องมือเครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) ซึ่งใช้ไทรสเตอร์แบบ 6 พัลส์ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณขั้วเบตตามมุมจุดชนวนที่ป้อนเข้า โดยใช้เครื่องมือเฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop, PLL) ในการสร้างสัญญาณ  $\omega t$  ของแรงดันไลน์อ้างอิงที่วัดจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อป้อนเข้าเครื่องกำเนิดพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

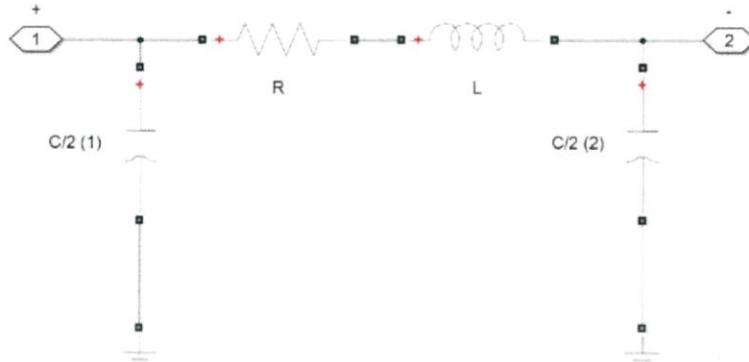


รูปที่ 3.22 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์สำหรับเรกติไฟเออร์



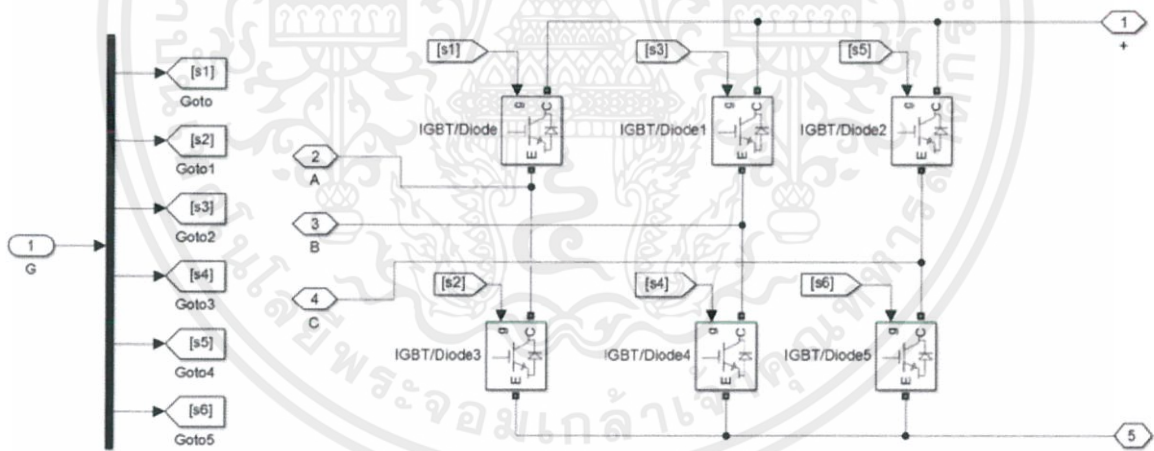
รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมมุมจุดชนวน

สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงของระบบจำลองใช้ระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง (DC line) โดยไดอะแกรมภายในระบบย่อยแสดงดังรูป 3.24 ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุต่อเป็นวงจรสมมูลพาย โดยกำหนดความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่งดังตารางที่ 3.4 จำลองระบบที่มีความยาว 150 300 และ 600 กิโลเมตร

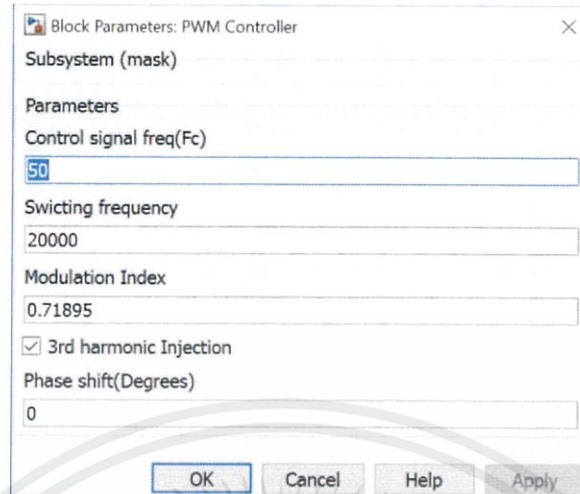


รูปที่ 3.24 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง

อินเวอร์เตอร์ของระบบจำลองใช้ระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.25 ประกอบไปด้วยไอจีบีทีที่ต่อกันเป็นวงจรถรบริดจ์ รับสัญญาณควบคุมเกตจากระบบย่อยของตัวควบคุมพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM Controller) รายละเอียดการตั้งค่าแสดงดังรูปที่ 3.26 โดยกำหนดดรรชนีการมอดูเลชัน (Modulation index) เพื่อให้แรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 220 V

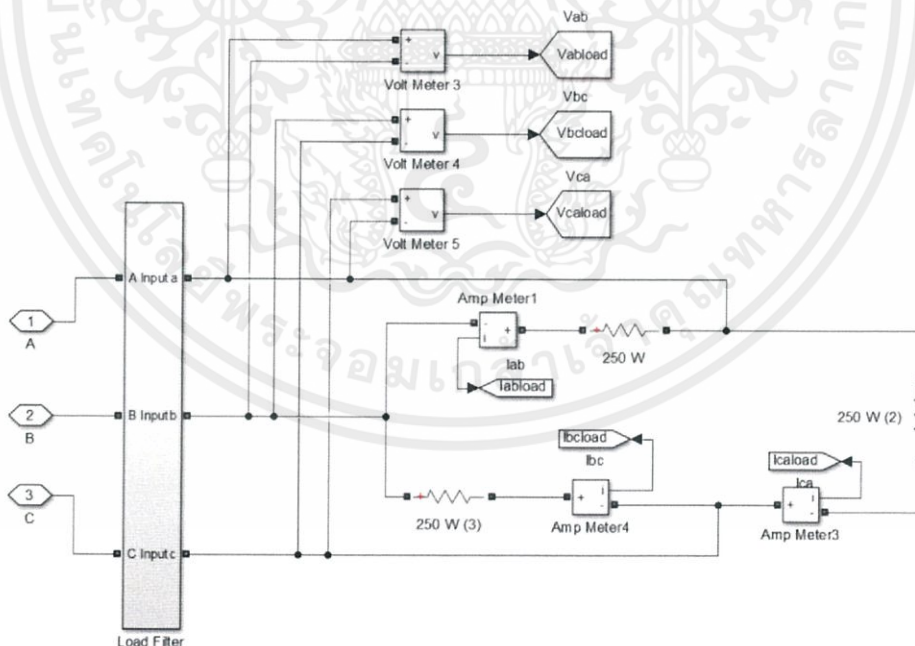


รูปที่ 3.25 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์

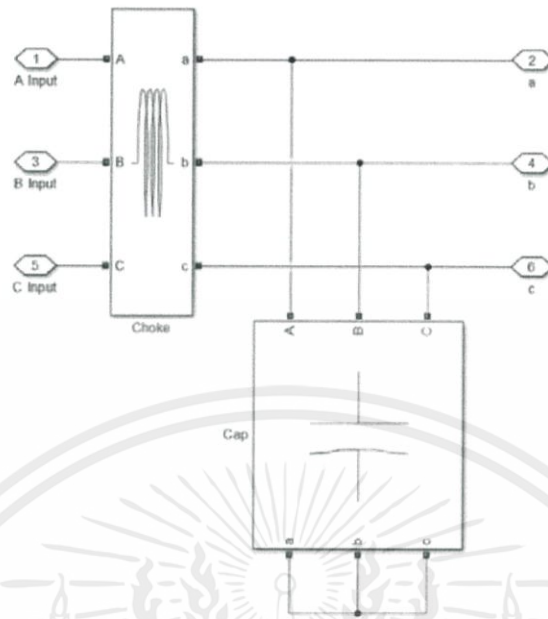


รูปที่ 3.26 โดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมพีดีบีเบิลยูเอ็ม

โหลดของระบบจำลองแทนด้วยระบบย่อยของโหลดโดยโดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.27 ประกอบไปด้วยตัวกรองไฟฟ้าและโหลด ใช้เครื่องมือโหลดอาร์แอลซีแบบอนุกรม (Series RLC Load) เลือกใช้เป็นโหลดตัวต้านทานต่อแบบเดลต้า และโดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของโหลด (Load Filter) ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 3.5 mH และตัวเก็บประจุขนาด 2  $\mu$ F แสดงดังรูป 3.28



รูปที่ 3.27 โดอะแกรมภายในระบบย่อยของโหลด



รูปที่ 3.28 โดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของไหล

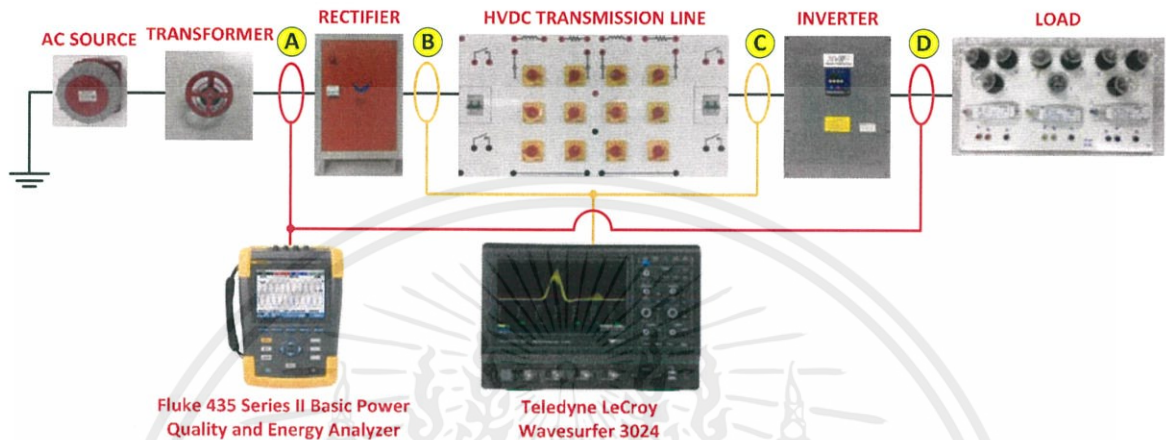
### 3.3 การทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

การทดลองใช้ไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้หม้อแปลง 3 เฟส ปรับค่าได้เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เรกติไฟเออร์ 3 เฟส เอาต์พุตของเรกติไฟเออร์เชื่อมกับต้นทางของระบบจำลองสายส่งที่ได้ออกแบบไว้ ปลายทางของระบบจำลองสายส่งต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ในการทดลองทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งเพื่อจำลองความยาวของสายส่งตั้งแต่ระยะ 150 – 600 กิโลเมตร ทำการศึกษา ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 3 กรณี ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของสายส่งที่ ความยาวสายระยะต่าง ๆ ขณะจ่ายโหลด และการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อ เปลี่ยนชนิดของโหลด

1. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายส่ง ทดลองที่ความยาว 150 300 และ 600 กิโลเมตร โดยพิกัดแรงดันของสายส่งและโหลดคงที่ บันทึกค่ากระแส กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง

2. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันของสายส่ง ทดลองที่พิกัดแรงดัน 450 V และ 500 V โดยความยาวสายส่งและโหลดคงที่ บันทึกค่ากระแส กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง

3. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนชนิดของโหลด ทดลองใช้ โหลดต่างชนิดกัน ได้แก่ โหลด 300 W 750 W และ 1500 W โดยพิกัดแรงดันและความยาวของสายส่ง คงที่ บันทึกค่ากระแส กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง



รูปที่ 3.29 ไดอะแกรมเส้นเดียวของการทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

การบันทึกผลการทดลองนั้นแสดงตำแหน่งวัดค่าดังรูปที่ 3.29 โดยวัดปริมาณไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟสด้วยเครื่องวัด Fluke 435 Series II Basic Power Quality and Energy Analyzer โดยวัดสองตำแหน่งคือ ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้ (ตำแหน่ง A) และบริเวณโหลด (ตำแหน่ง D) ส่วนปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงนั้นใช้เครื่องมือวัด Teledyne LeCroy Wavesurfer 3024 โดยทำการวัดค่าและบันทึกรูปคลื่นกระแสและแรงดันสองตำแหน่ง บริเวณต้นทาง (ตำแหน่ง B) และปลายทาง (ตำแหน่ง C) ของระบบสายส่ง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยจำลองระบบสายส่งเป็นวงจรสมมูลพาย ( $\pi$ ) ซึ่งออกแบบชุดทดลองจากการเปรียบเทียบจากระบบจริงที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้า Gurun ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (TNB) และสถานีไฟฟ้าคลองแวงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งมีพิกัด 300 kV 300 MW ในการทดลองแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลและศึกษาพฤติกรรมของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

#### 4.1 การจำลองระบบสายส่งของชุดทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบไว้กับตัวอย่างระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.5 เป็นระบบ 250 kV 500 MW มีความยาวสายส่ง 300 กิโลเมตร โดยเรคตีไฟเออร์ใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์และอินเวอร์เตอร์แทนด้วยวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์

##### 1. ระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW

ผลการจำลองระบบ สายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.1 พฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ จะถูกกำหนดด้วยวงจรควบคุมของระบบตัวอย่าง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ช่วงเวลาจาก 0 ถึง 0.3 วินาที จากรูปที่ 4.1 (ก) กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าไว้ที่ค่าคงที่ 0.5 pu (1 kA) กระแสในสายส่งเริ่มต้นจากศูนย์ไปถึงสภาวะคงตัวที่เวลา 0.1 วินาที และมุมจุดชนวนที่ทำให้กระแสมีค่า 0.5 pu มีค่าประมาณ  $60^\circ$  ดังรูปที่ 4.1 (ค)

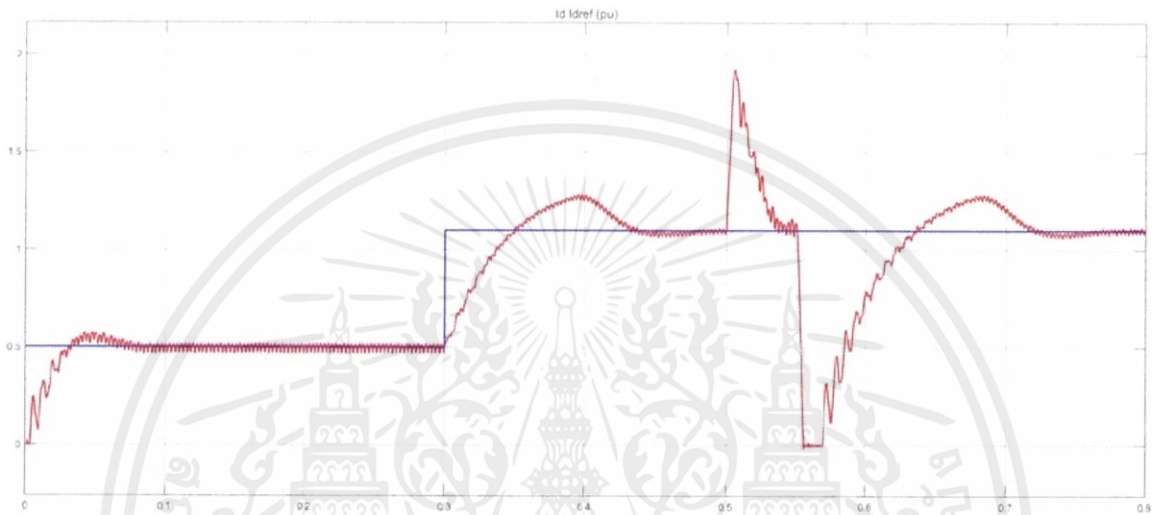
ช่วงเวลาจาก 0.3 ถึง 0.5 วินาที จากรูปที่ 4.1 (ก) ที่เวลา 0.3 วินาที กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าให้เพิ่มขึ้น 0.6 pu การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงใช้เวลาประมาณ 0.13 วินาทีจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมุมจุดชนวนลดลงจาก  $60^\circ$  เป็น  $45^\circ$  ดังรูปที่ 4.1 (ค)

ช่วงเวลาจาก 0.5 ถึง 0.55 วินาที เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบที่เวลา 0.5 วินาที กระแสผิดพลาดสูงสุดมีค่าประมาณ 5 kA ดังรูปที่ 4.1 (จ)

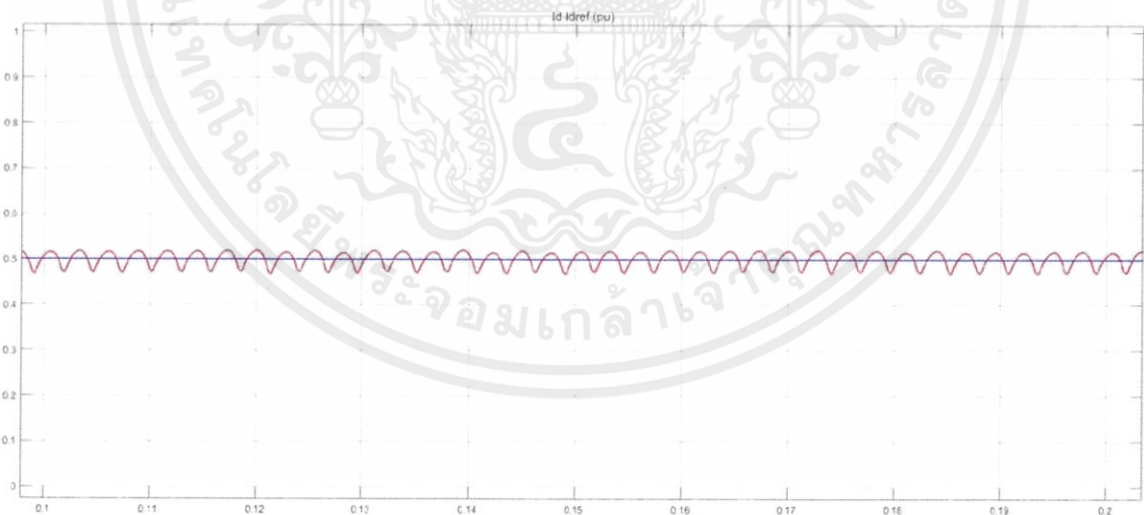
ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.1 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น  $165^\circ$  ทำให้เรคตีไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่ง

พลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 315 kV และกระแสผิดพลาดถูกกำจัดออกจากระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (จ)

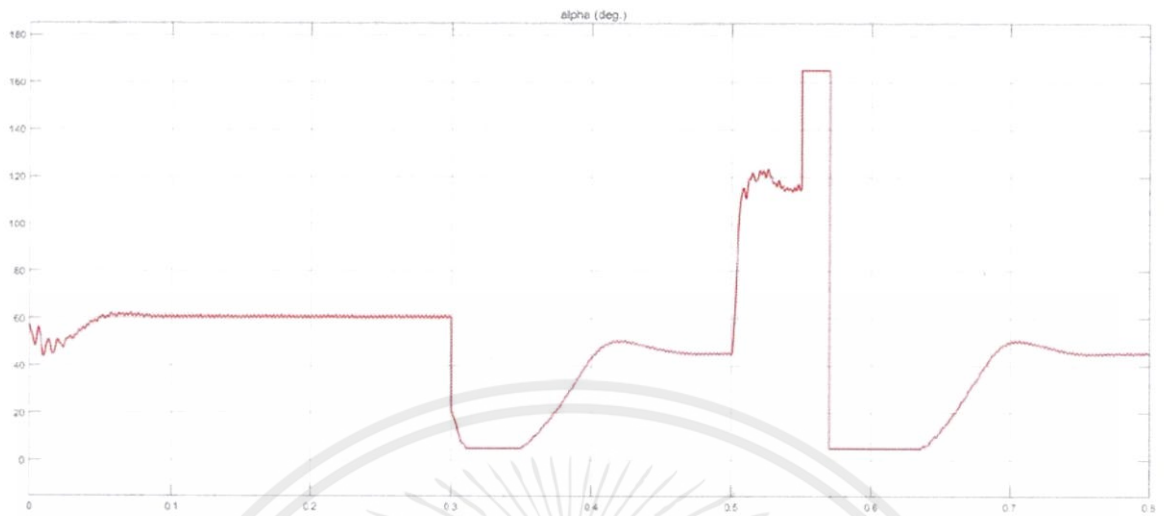
ช่วงเวลาจาก 0.57 ถึง 0.8 วินาที ที่เวลา 0.57 วินาที ระบบกลับมาเริ่มต้นทำงานที่สภาวะปกติอีกครั้ง และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 0.75 วินาที



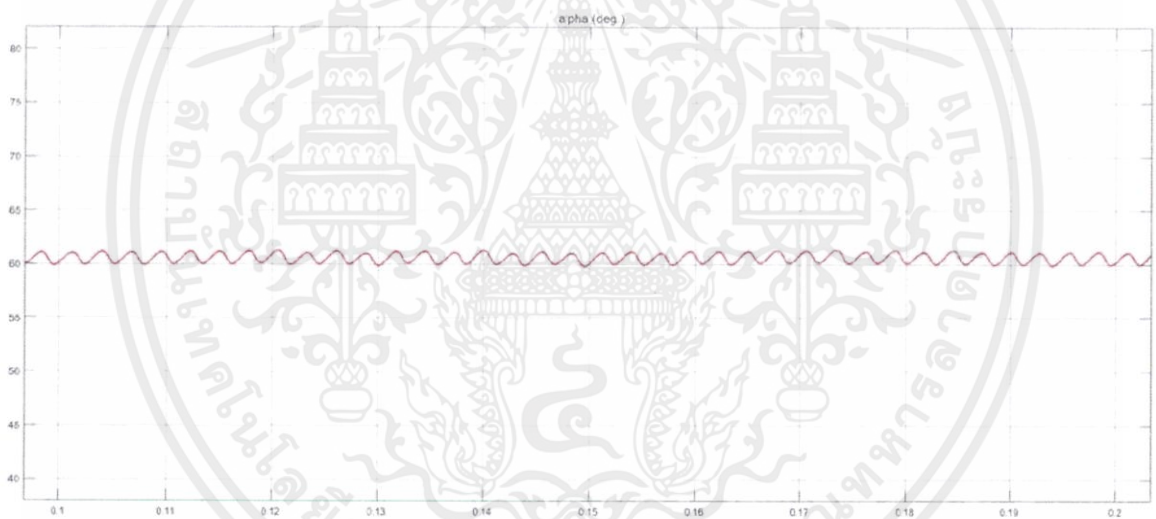
(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง ( $I_d$ , สีแดง) และกระแสอ้างอิง ( $I_{dref}$ , สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

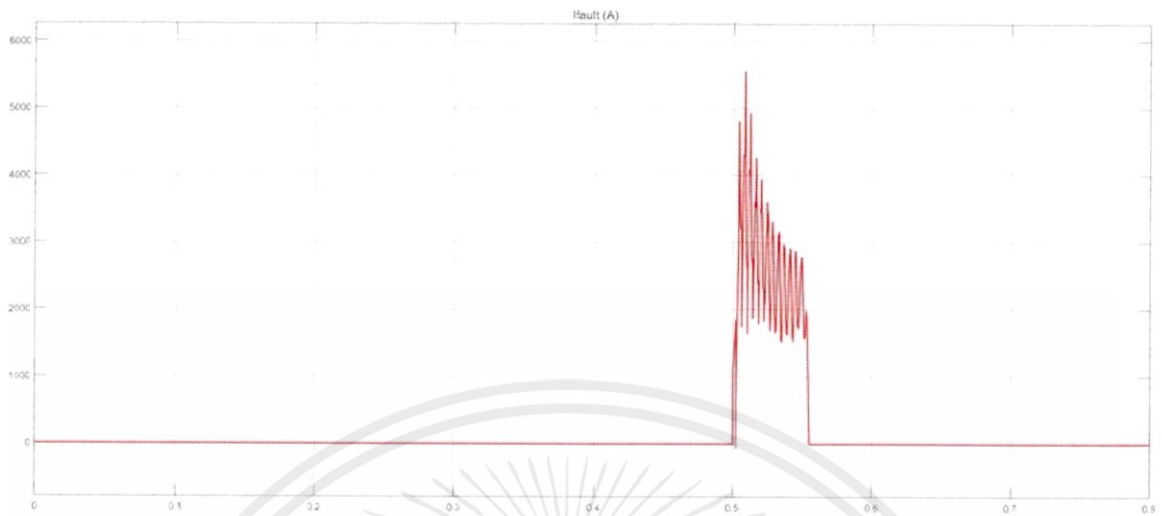


(ค) มุมจุดชนวน (Alpha angle)

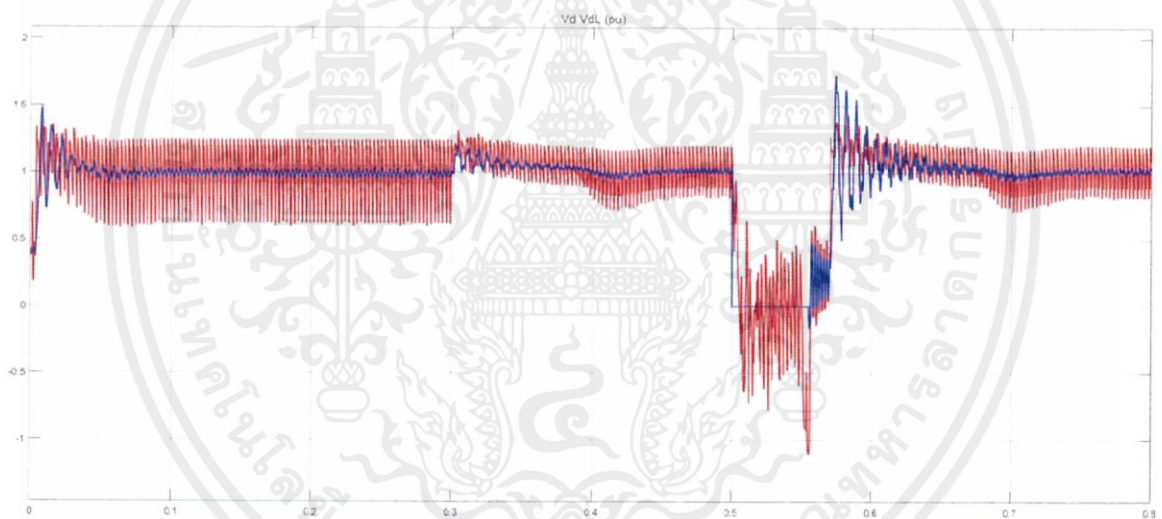


(ง) ภาพขยายมุมจุดชนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

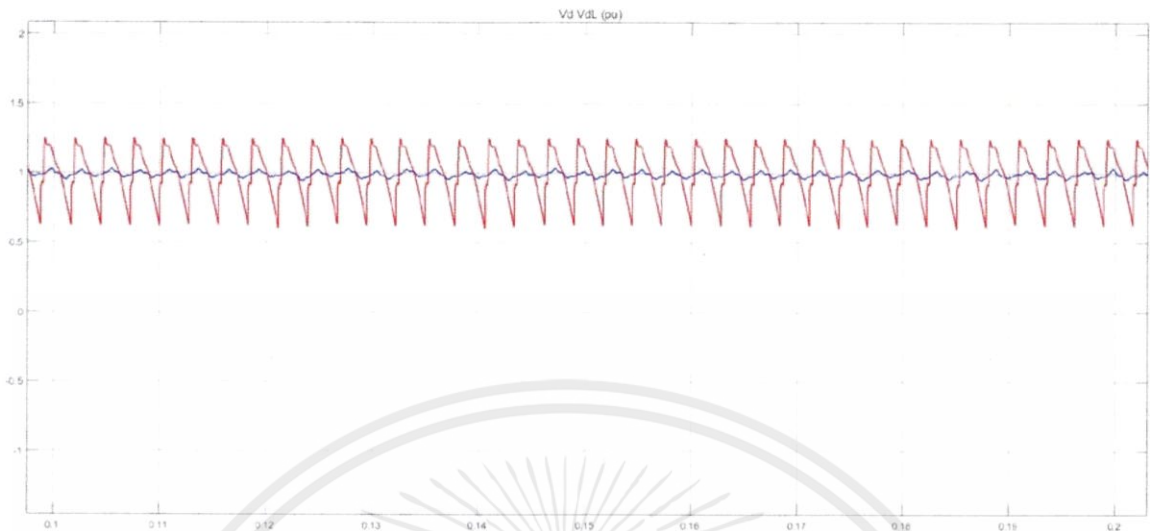


(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพลาด (Ifault)



(ฉ) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์ (Vd, สีน้ำเงิน) และแรงดันต้นทางของสายส่ง (VdL, สีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

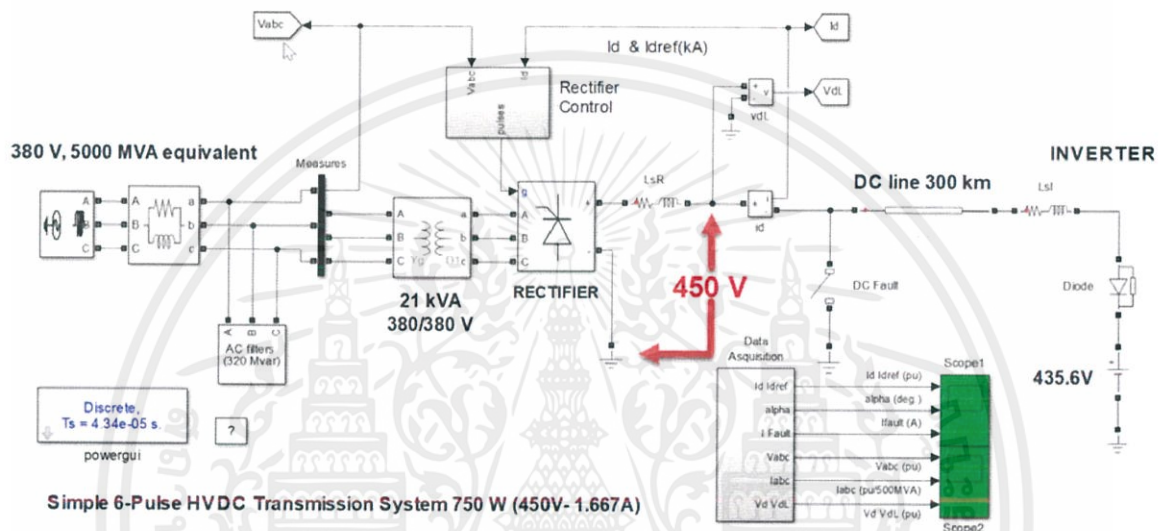


(ซ) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์และแรงดันต้นทางของสายส่ง  
ที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

รูปที่ 4.1 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA)  
ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที

## 2. ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 450 V 750 W

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของชุดทดลองที่ออกแบบไว้ โดยจำลองผ่านระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยนำระบบตัวอย่างมาเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3.8 โดยยังใช้วงจรควบคุมของระบบตัวอย่างเช่นเดิม



รูปที่ 4.2 ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (450V - 1.667A)

พฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

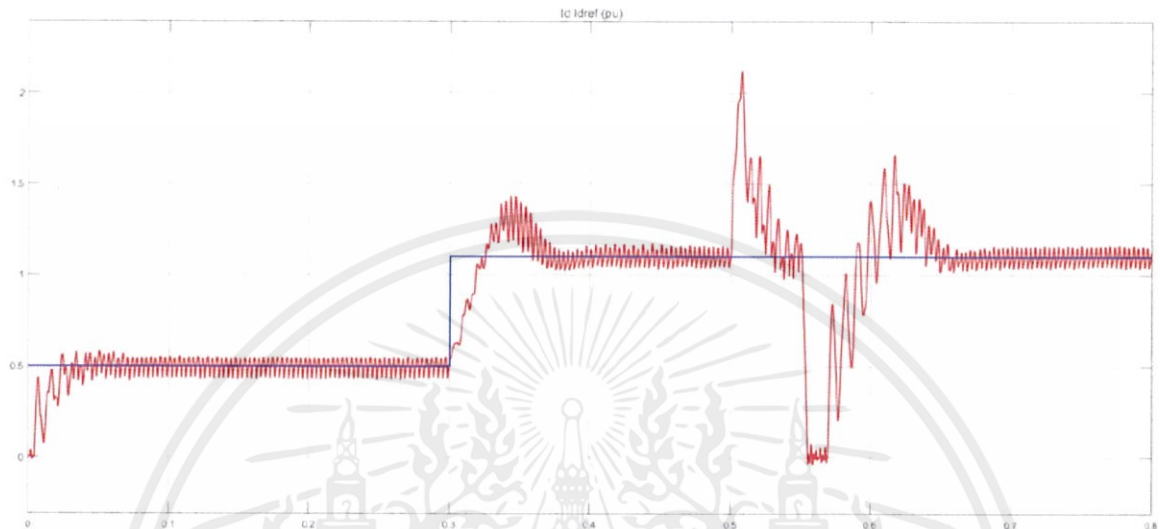
ช่วงเวลาจาก 0 ถึง 0.3 วินาที จากรูปที่ 4.3 (ก) กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าไว้ที่ค่าคงที่ 0.5 pu (0.833A) กระแสในสายส่งเริ่มต้นจากศูนย์ไปถึงสภาวะคงตัวที่เวลา 0.075 วินาที และมุมจุดชนวนที่ทำให้กระแสมีค่า 0.5 pu มีค่าประมาณ  $60^\circ$  ดังรูปที่ 4.3 (ค)

ช่วงเวลาจาก 0.3 ถึง 0.5 วินาที จากรูปที่ 4.3 (ก) ที่เวลา 0.3 วินาที กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าให้เพิ่มขึ้น 0.6 pu การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงใช้เวลาประมาณ 0.1 วินาที จึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมุมจุดชนวนลดลงจาก  $60^\circ$  เป็น  $50^\circ$  ดังรูปที่ 4.3 (ค)

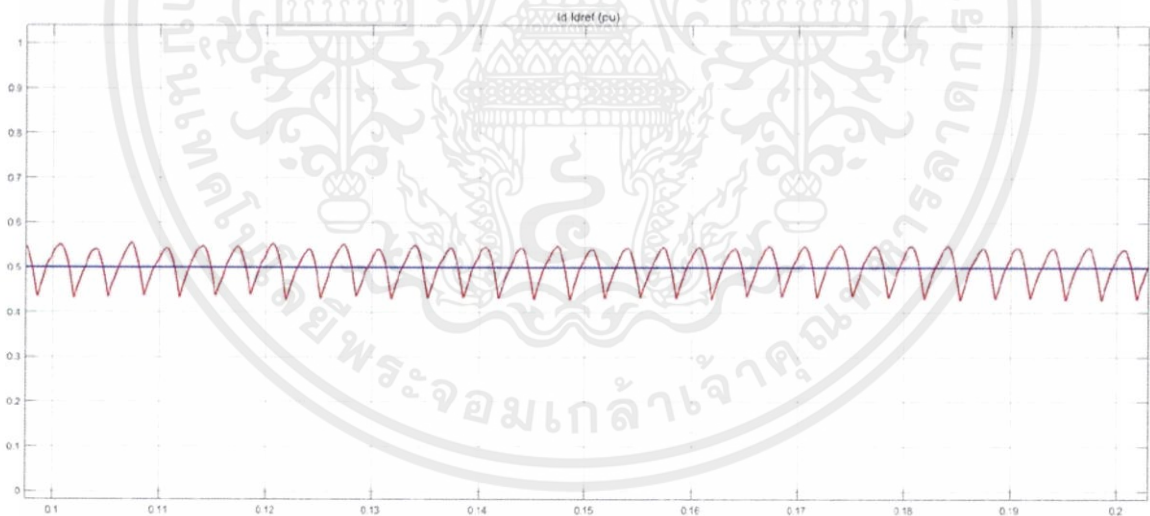
ช่วงเวลาจาก 0.5 ถึง 0.55 วินาที เกิดความผิดปกติในระบบที่เวลา 0.5 วินาที กระแสผิดปกติสูงสุดมีค่าประมาณ 6 kA ดังรูปที่ 4.3 (จ)

ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.3 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น  $165^\circ$  ทำให้เรกติไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่งพลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 400 V และกระแสผิดปกติถูกกำจัดออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 4.3 (จ)

ช่วงเวลาจาก 0.57 ถึง 0.8 วินาที ที่เวลา 0.57 วินาที ระบบกลับมาเริ่มทำงานที่สภาวะปกติอีกครั้ง และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 0.67 วินาที

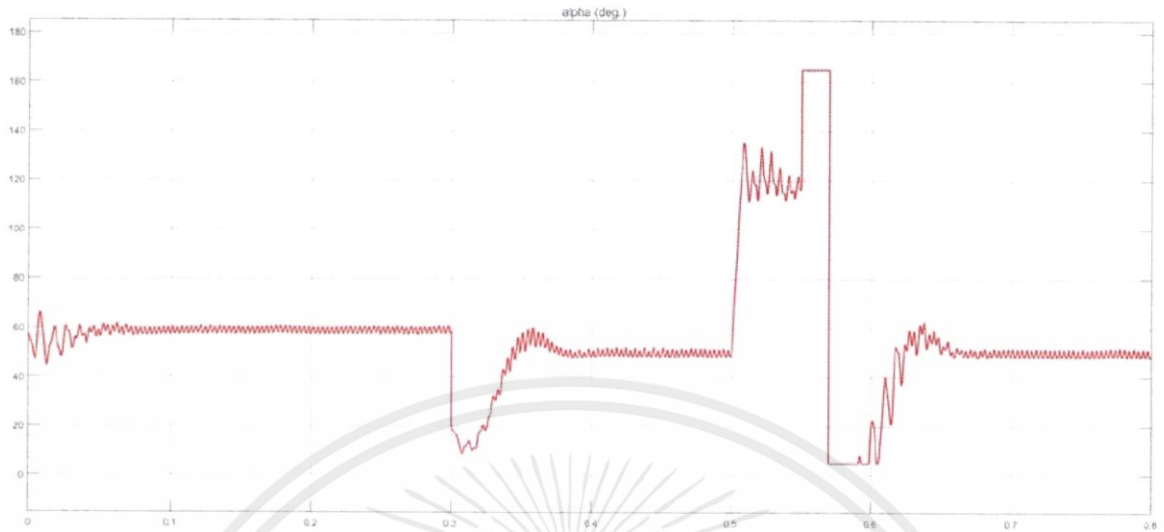


(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง ( $I_d$ , สีแดง) และกระแสอ้างอิง ( $I_{dref}$ , สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

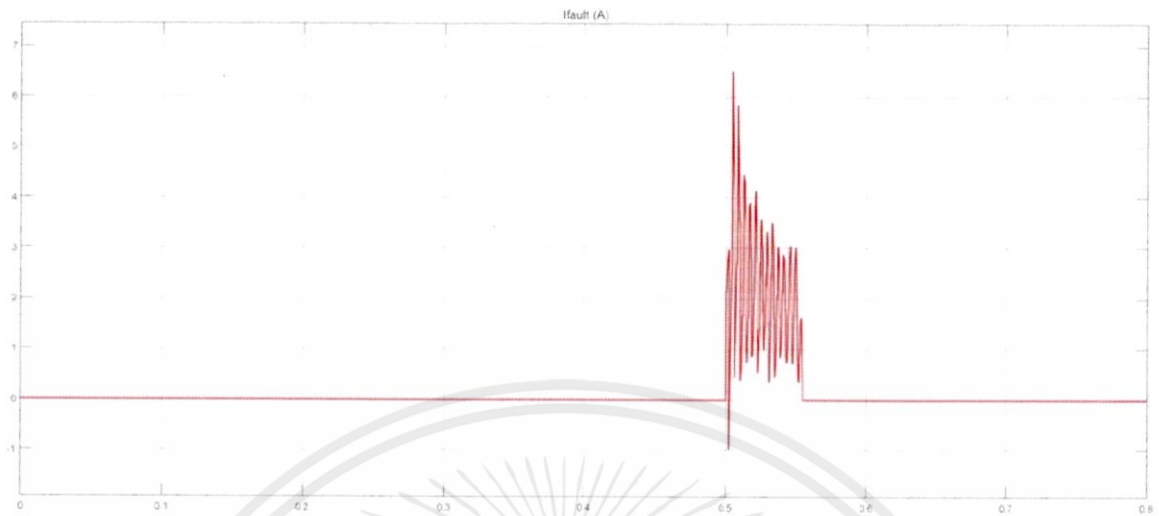


(ค) ภาพมุมจุดขนวน (Alpha angle)

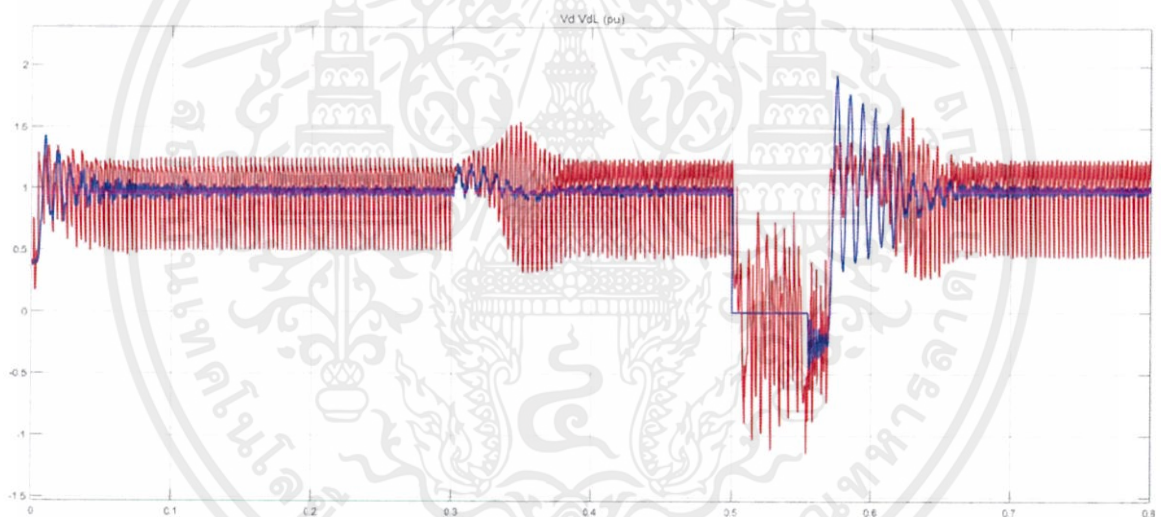


(ง) ภาพขยายมุมจุดขนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

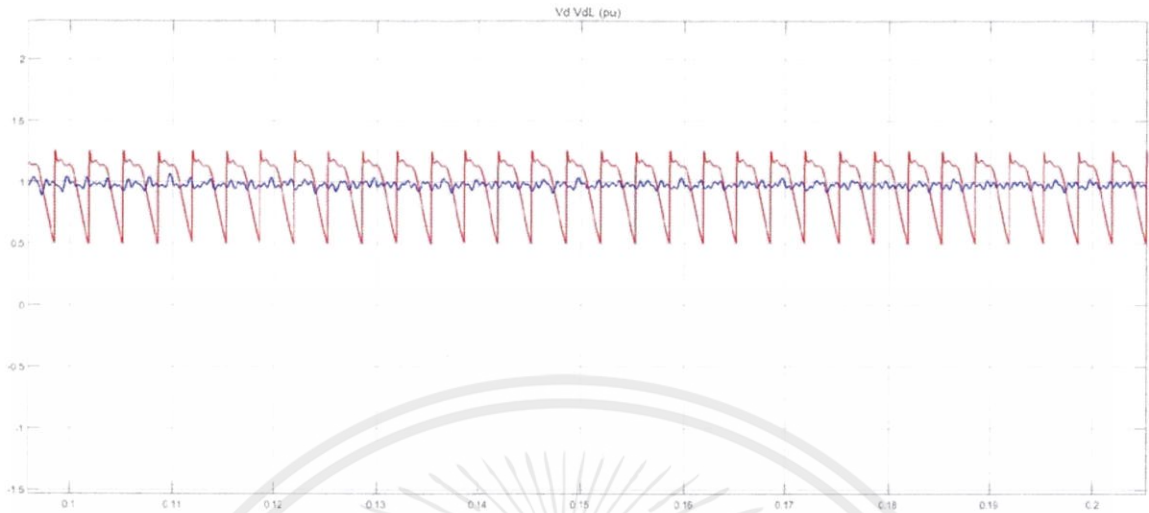


(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพลาด (Ifault)



(ฉ) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์ ( $V_d$ , สีน้ำเงิน) และแรงดันต้นทางของสายส่ง ( $V_{dL}$ , สีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

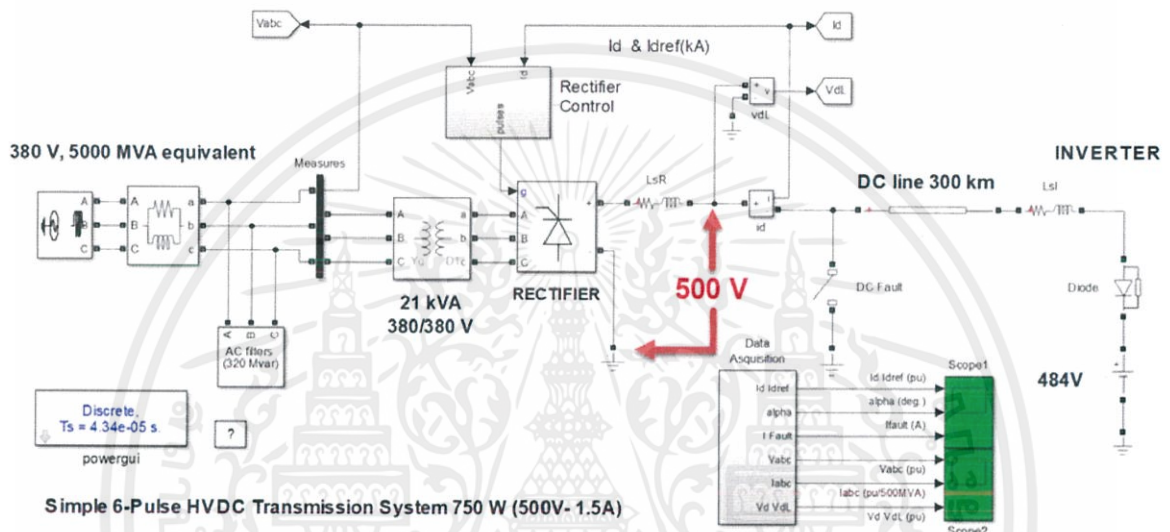


(ซ) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์และแรงดันต้นทางของสายส่ง  
ที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

รูปที่ 4.3 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W  
(450V - 1.667A) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที

### 3. ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 500 V 750 W

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของชุดทดลองที่ออกแบบไว้ โดยจำลองผ่านระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยนำระบบตัวอย่างมาเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ดังตารางที่ 3.8 โดยยังใช้วงจรควบคุมของระบบตัวอย่าง



รูปที่ 4.4 ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (500V - 1.5A)

พฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

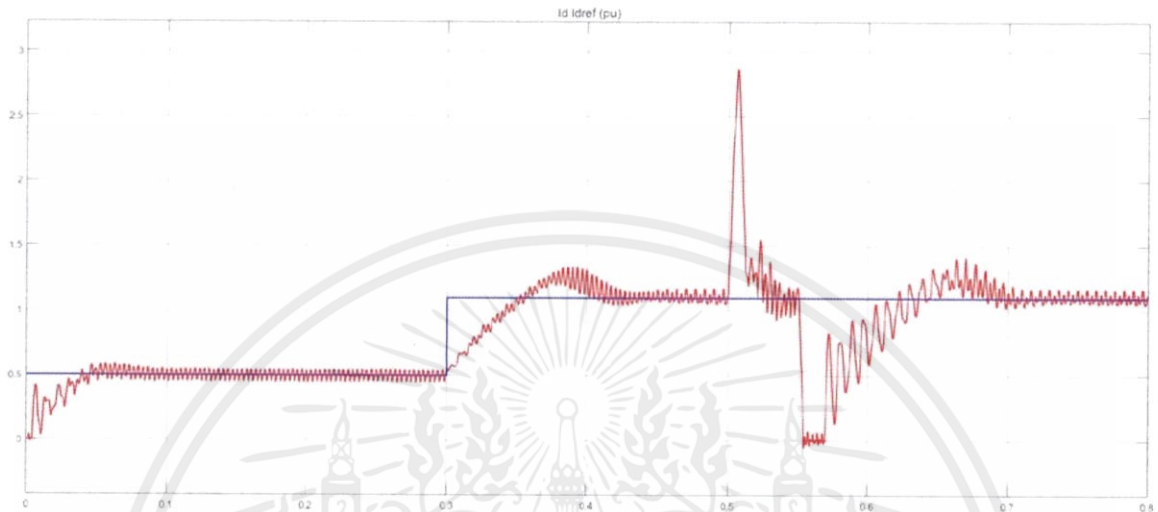
ช่วงเวลาจาก 0 ถึง 0.3 วินาที จากรูปที่ 4.5 (ก) กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าไว้ที่ค่าคงที่ 0.5 pu (0.75A) กระแสในสายส่งเริ่มต้นจากศูนย์ไปถึงสภาวะคงตัวที่เวลา 0.055 วินาที และมีมุมจุดชนวนที่ทำให้กระแสมีค่า 0.5 pu มีค่าประมาณ  $60^\circ$  ดังรูปที่ 4.5 (ค)

ช่วงเวลาจาก 0.3 ถึง 0.5 วินาที จากรูปที่ 4.5 (ก) ที่เวลา 0.3 วินาที กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าให้เพิ่มขึ้น 0.6 pu การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงใช้เวลาประมาณ 0.075 วินาทีจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมีมุมจุดชนวนลดลงจาก  $60^\circ$  เป็น  $50^\circ$  ดังรูปที่ 4.5 (ค)

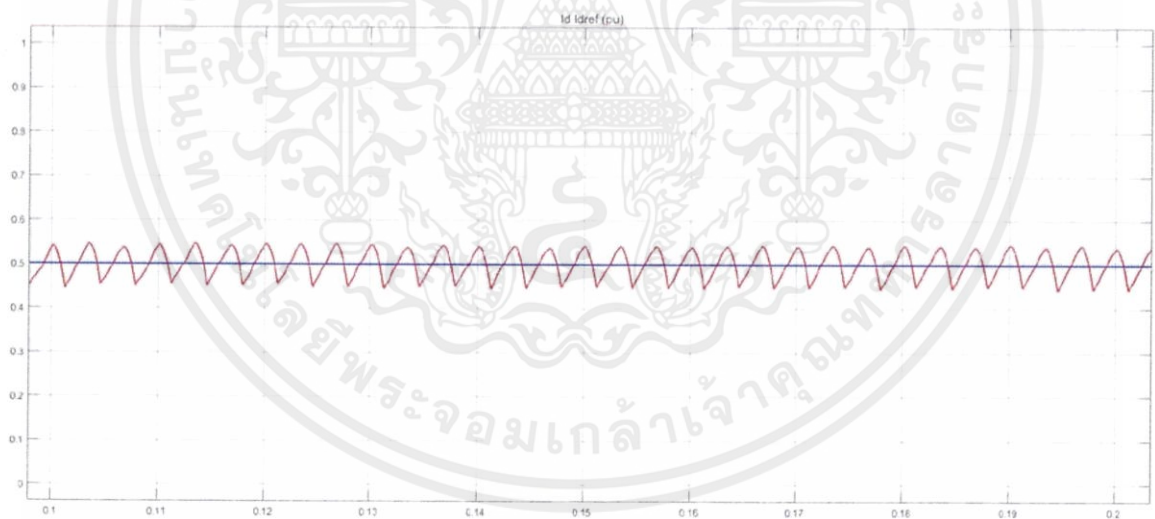
ช่วงเวลาจาก 0.5 ถึง 0.55 วินาที เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบที่เวลา 0.5 วินาที กระแสผิดพลาดสูงสุดมีค่าประมาณ 5 kA ดังรูปที่ 4.5 (จ)

ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.5 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น  $165^\circ$  ทำให้เรกติไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่งพลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 400 V และกระแสผิดพลาดถูกกำจัดออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 4.5 (จ)

ช่วงเวลาจาก 0.57 ถึง 0.8 วินาที ที่เวลา 0.57 วินาที ระบบกลับมาเริ่มต้นทำงานที่สภาวะปกติอีกครั้ง และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 0.67 วินาที

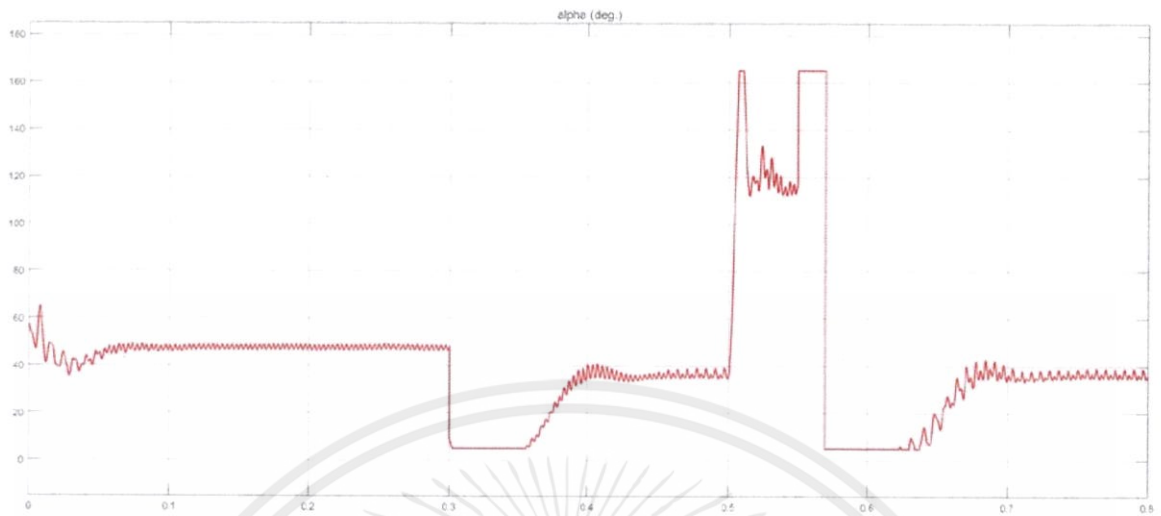


(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง (Id, สีแดง) และกระแสอ้างอิง (Idref, สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

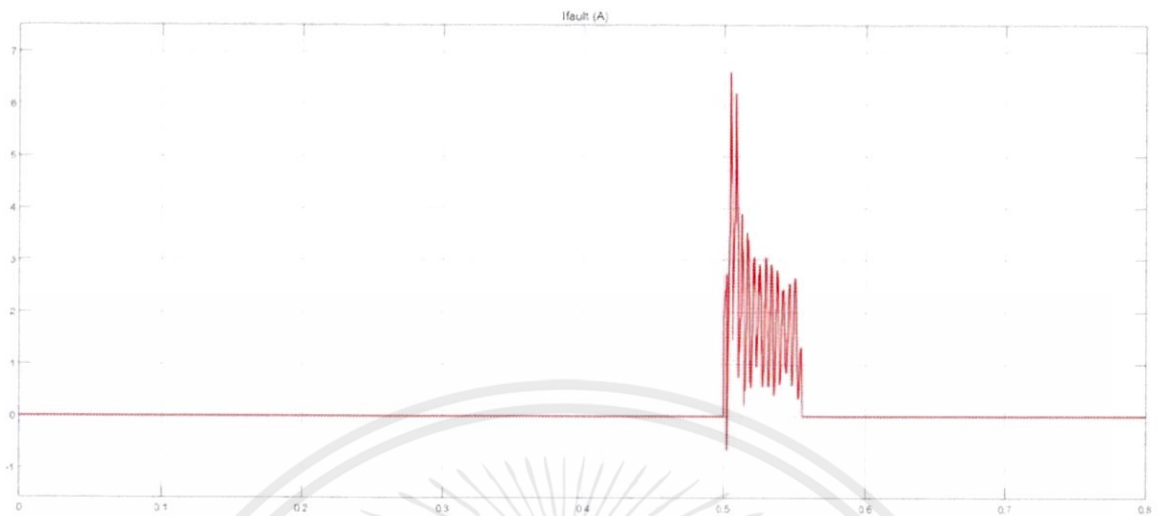


(ค) มุมจุดขนวน (Alpha angle)

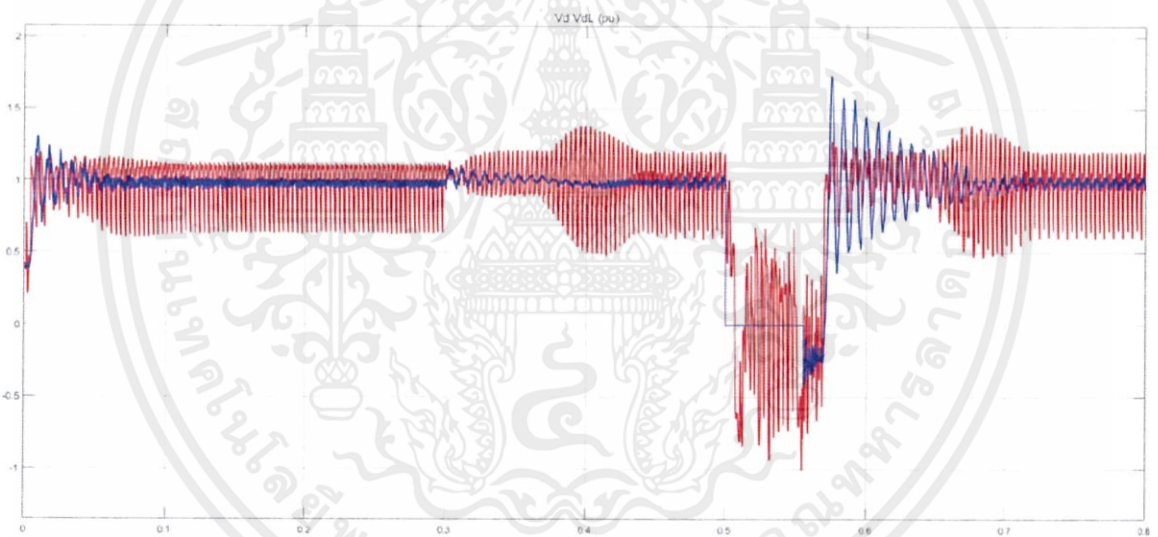


(ง) ภาพขยายมุมจุดขนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

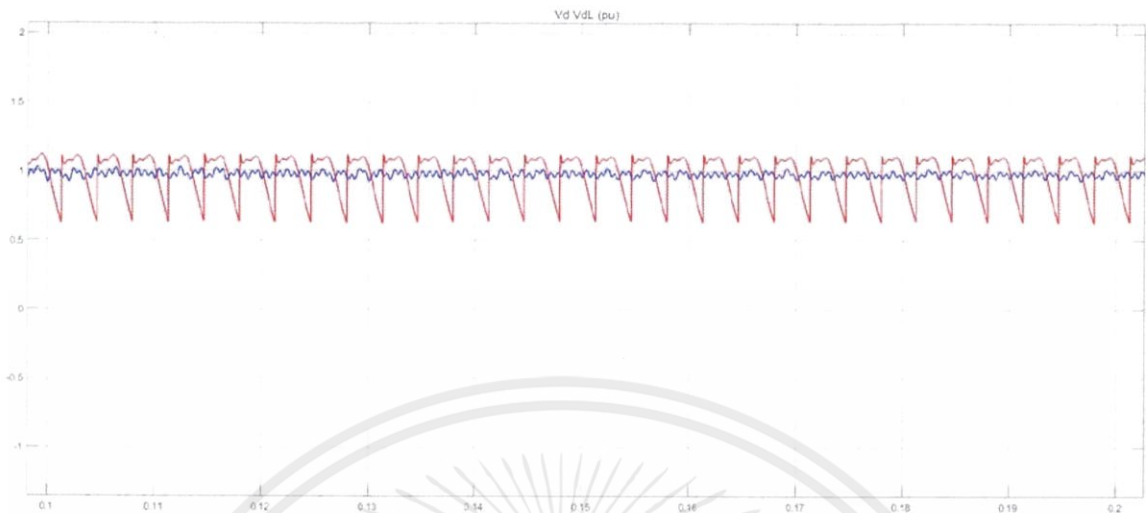


(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพลาด (Ifault)



(ข) รูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์ ( $V_d$ , สีน้ำเงิน) และแรงดันต้นทางของสายส่ง ( $V_{dL}$ , สีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์และแรงดันต้นทางของสายส่ง  
ที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W (500V - 1.5A)  
ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที

จากรูปคลื่นกระแสในสายส่ง (สีแดง) ของระบบจำลองที่ออกแบบแต่ละพิกัด พบว่ามีลักษณะรูปคลื่นคล้ายกับระบบตัวอย่าง แต่กระแสที่พิกัดแรงดัน 450 V มีการแกว่งรอบกระแสอ้างอิงและริบเปิลมากกว่าพิกัดแรงดัน 500 V เนื่องจากสายส่งพิกัดแรงดัน 500 V มีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าทำให้การเปลี่ยนแปลงกระแสน้อยกว่า

จากรูปคลื่นมุมจุดชนวนของระบบจำลองที่ออกแบบแต่ละพิกัด ระบบตัวอย่างมีการแกว่งของมุมจุดชนวนน้อยที่สุดเพราะระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบตัวอย่างถูกออกแบบมาดีแล้ว เมื่อนำระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบตัวอย่างมาใช้กับระบบจำลองที่ออกแบบไว้ พบว่ามุมจุดชนวนที่พิกัดแรงดัน 500 V มีการแกว่งมากกว่าที่พิกัดแรงดัน 450 V ซึ่งการแกว่งของมุมจุดชนวนอาจทำให้ลดลงได้ด้วยการปรับค่าพีไอของระบบควบคุมป้อนกลับ

จากรูปคลื่นแรงดันต้นทางของสายส่ง (สีแดง) ของระบบจำลองที่ออกแบบไว้ พบว่าทั้งสองพิกัดแรงดันมีลักษณะคล้ายกับระบบตัวอย่างที่ออกแบบ แตกต่างกันที่ความกว้างพัลส์ของรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งพิกัดแรงดัน 500 V จะมีความกว้างพัลส์มากกว่าพิกัดแรงดัน 450V

## 4.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบไว้สำหรับสร้างเป็นชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง วงจรของชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 3.8 จำลองการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของสายส่ง ความยาวของสายส่งและพิกัดโหลด โดยกำหนดแรงดันที่เข้าเรกติไฟเออร์ 380 V และแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ 220 V

### 1. ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง

จำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จำลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร ผลการจำลองที่ความยาว 150 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.7

ผลการจำลองที่ความยาว 300 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.9

ผลการจำลองที่ความยาว 600 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.1 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันไลน์ AB	V	377.3	377.3	377.2
แรงดันไลน์ BC	V	377.3	377.3	377.2
แรงดันไลน์ CA	V	377.3	377.3	377.2
กระแสเฟส A	A	1.274	1.277	1.298
กระแสเฟส B	A	1.275	1.278	1.303
กระแสเฟส C	A	1.274	1.278	1.299
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	273.10	274.50	278.20
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	273.50	274.60	279.20
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	273.30	275.00	278.10
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	48.42	43.68	50.13
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	48.51	43.10	50.77
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	48.78	43.46	51.47

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเพิ่มขึ้น แรงดันไลน์ยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 377 V ส่วนกระแสในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ 150 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าเฟส A ได้ 1.274 A ที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่ากระแสเฟส A เพิ่มขึ้นมาที่ 1.277 A และที่ระยะ 600 กิโลเมตร วัดค่ากระแสเฟส A เพิ่มขึ้นมาที่ 1.298 A เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบต้องจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ 150 กิโลเมตร กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A มีค่า 273.1 W และ 48.42 var ตามลำดับ ที่ระยะ 300 กิโลเมตร กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A มีค่า 274.5 W และ 43.68 var ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตร กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A มีค่า 278.2 W และ 50.13 var ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	500.0	500.0	500.0
แรงดันขาออกสายส่ง	V	495.4	491.7	483.3
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.624	1.623	1.653
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.665	1.667	1.698
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	812.3	816.1	827.5
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	809.5	815.4	816.7

ตารางที่ 4.2 ปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดจุดต้นทางสายส่งนั้นสอดคล้องกับตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ 150 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.624 A และ 812.3 W ตามลำดับ ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.623 A และ 816.1 W ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.653 A และ 827.5 W ตามลำดับ และเมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าจุดปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่ 150 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสายส่งได้เท่ากับ 495.4 V ที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสายส่งได้เท่ากับ 491.7 V และที่ระยะ 600 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสายส่งได้เท่ากับ 483.3 V ส่วนกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่ 150 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.665 A และ 809.5 W ตามลำดับ ที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.667 A และ 815.4 W ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.698 A และ 816.7 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่ โหลด

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	218.8	218.6	219.5
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	219.3	219.1	218.6
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	218.9	218.7	219.6
กระแสเฟส AB	A	1.130	1.129	1.134
กระแสเฟส BC	A	1.133	1.132	1.129
กระแสเฟส CA	A	1.131	1.130	1.134
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	247.3	246.9	248.9
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	248.4	247.9	246.8
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	247.5	247.2	249.0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0	0

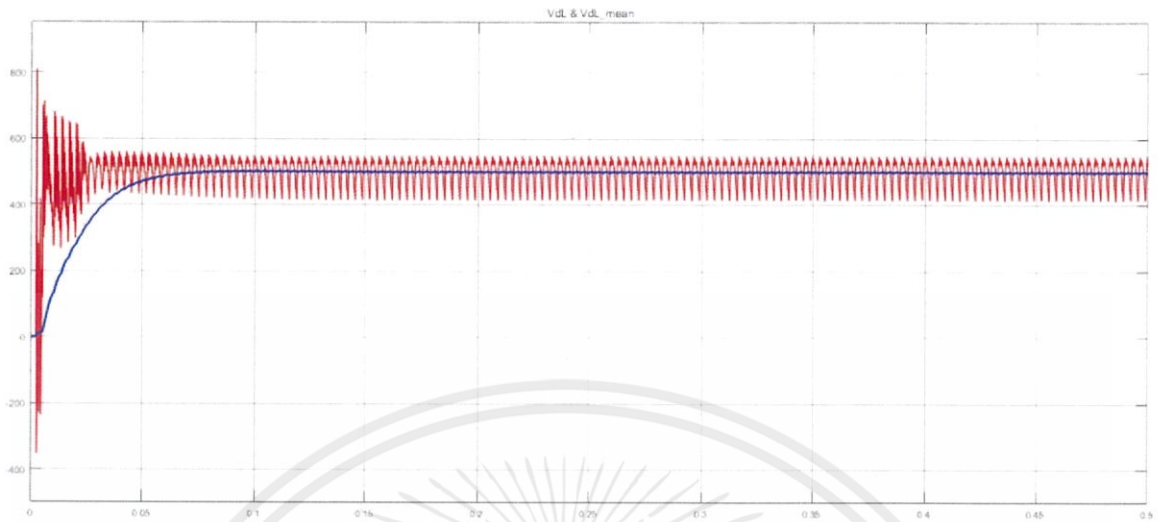
ตารางที่ 4.3 ปริมาณไฟฟ้าทั้งแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหลดมีค่าใกล้เคียงกันแม้มีการเปลี่ยนแปลงระยะสายส่ง โดยที่ระยะ 150 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของโหลดเฟส A ได้เท่ากับ 218.8 V 1.13 A และ 247.3 W ตามลำดับ ที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของโหลดเฟส A ได้เท่ากับ 218.6 V 1.129 A และ 246.9 W ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของโหลดเฟส A ได้เท่ากับ 219.5 V 1.134 A และ 248.9 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง

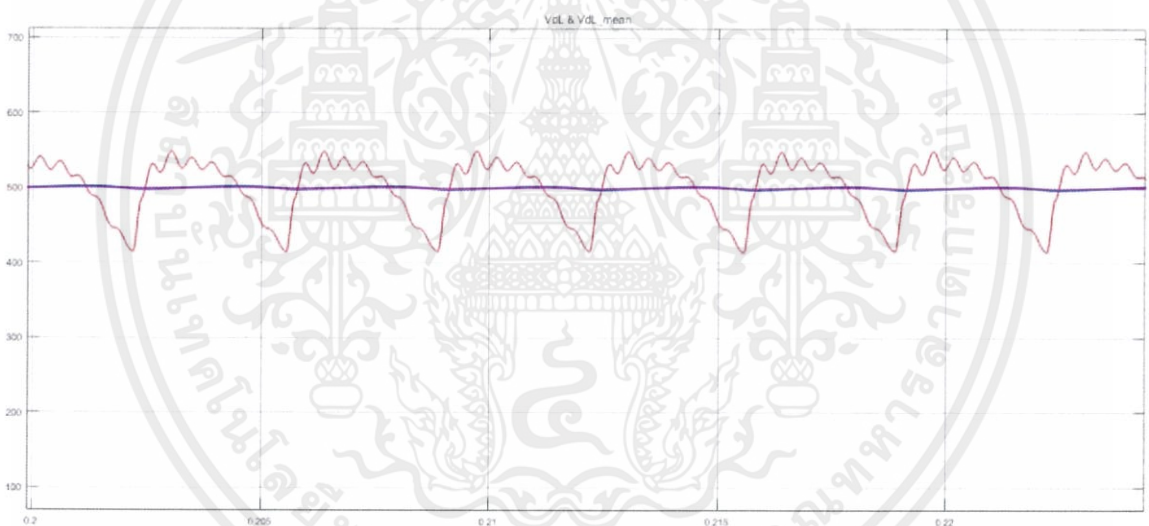
ระยะสายส่ง (km)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
150	819.9	812.3	809.5	743.2
300	824.1	816.1	815.4	742.0
600	835.5	827.5	816.7	744.7

จากตารางที่ 4.4 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) ของแต่ละระยะสายส่งมีค่าเกือบคงที่เท่ากับ 7.6 8 และ 8 W ตามลำดับ แต่กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.8 0.7 และ 10.8 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 66.3 73.4 และ 72 W ตามลำดับ

จากผลการจำลองเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นพบว่า ที่ความยาวสายส่ง 150 กิโลเมตร เกิดแรงดันตกในสายส่ง 0.92% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 99.66% ที่ความยาวสายส่ง 300 กิโลเมตร ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 1.66% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 99.91% และที่ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.34% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 98.69% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันตกที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความยาวที่เพิ่มขึ้น และหากไม่ปรับ Modulation index ของอินเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันขาออก โหลดจะได้รับกำลังไฟฟาลดลงไม่มาก

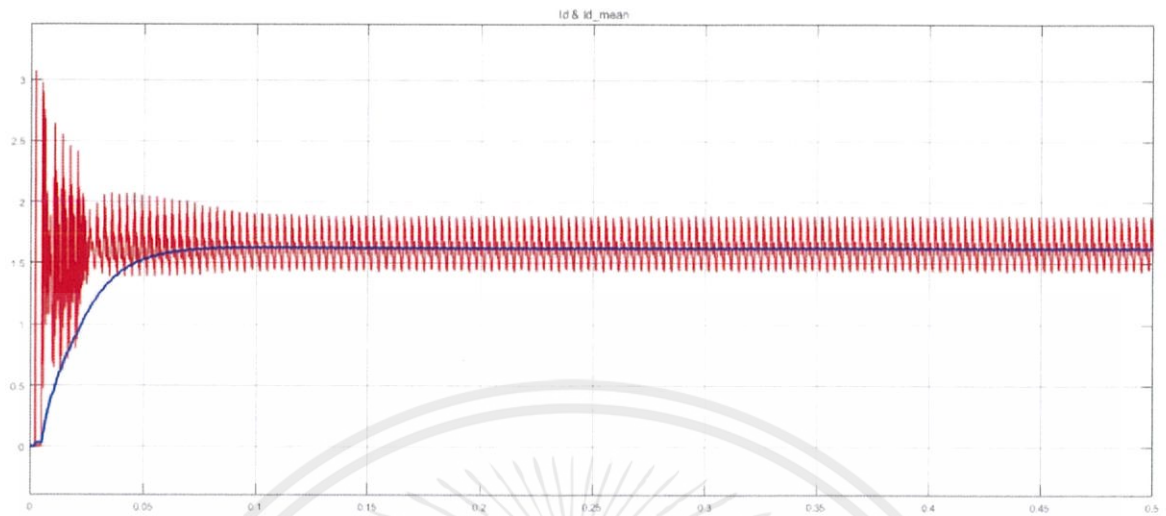


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

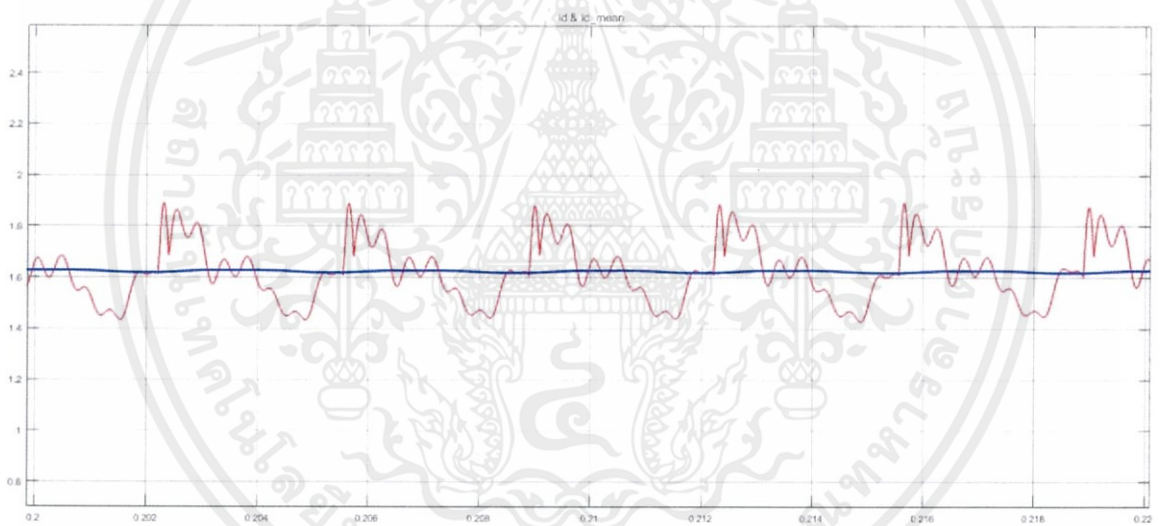


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

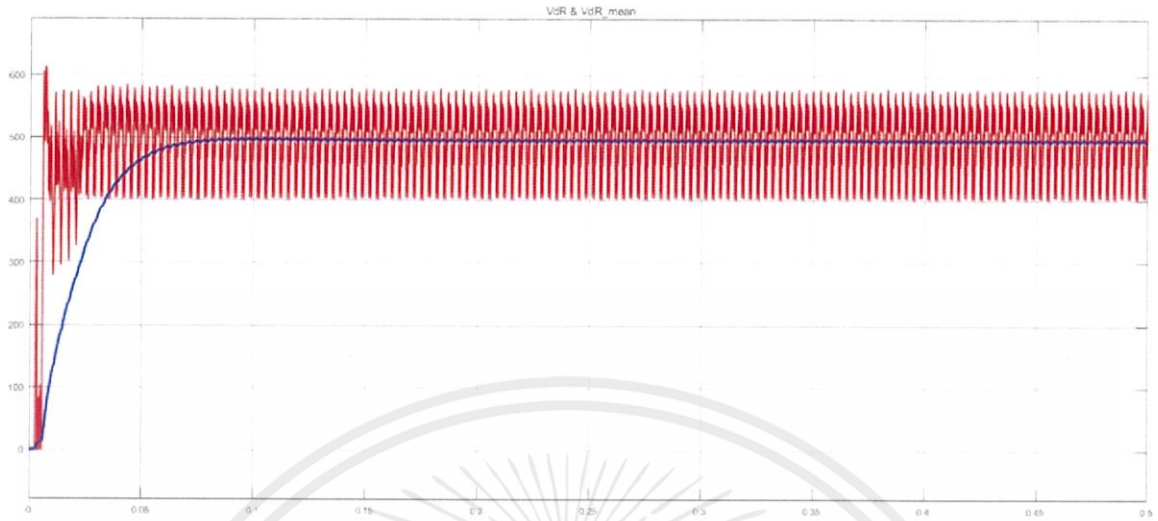


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

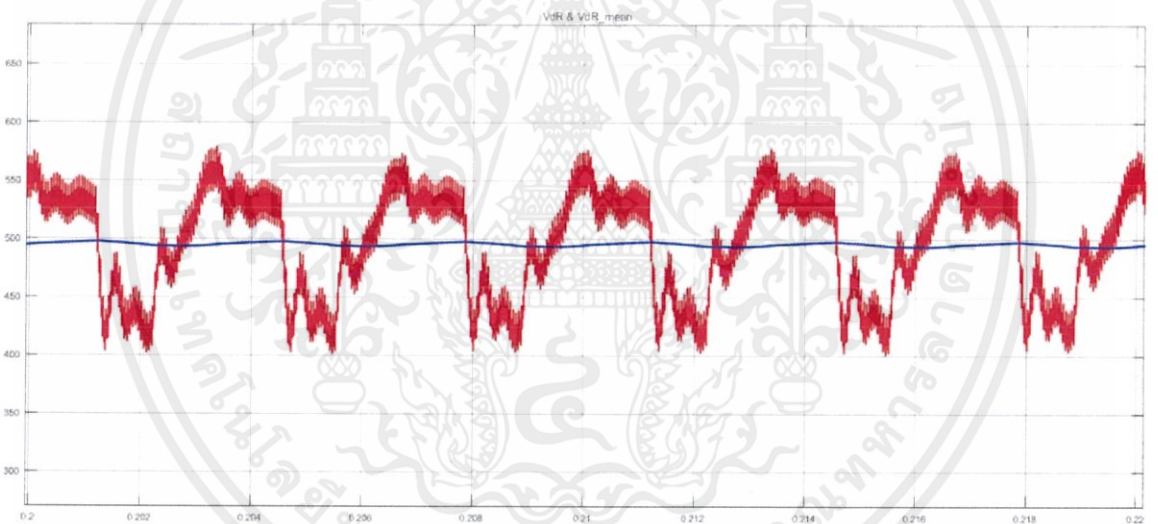


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.6 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร

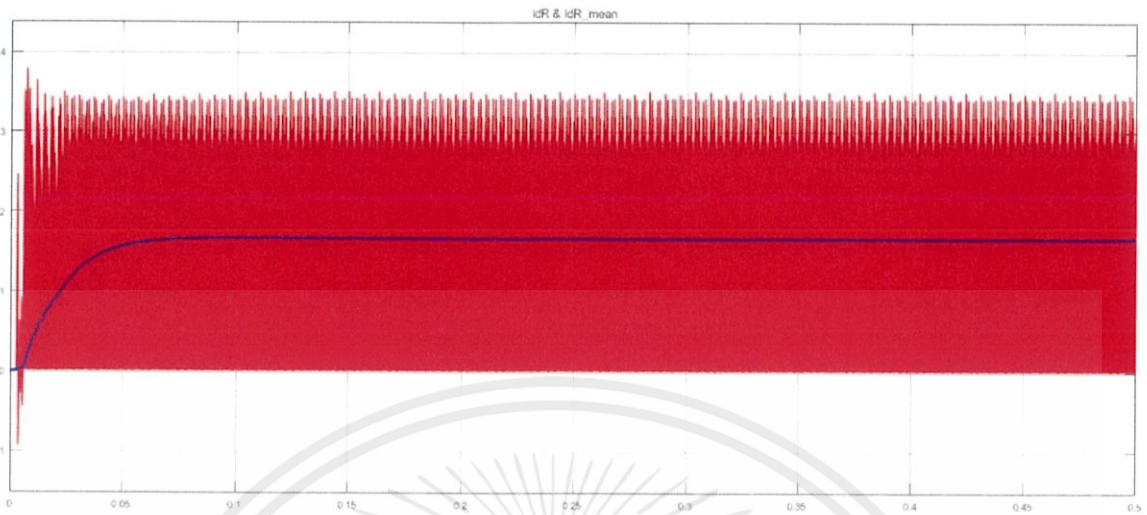


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

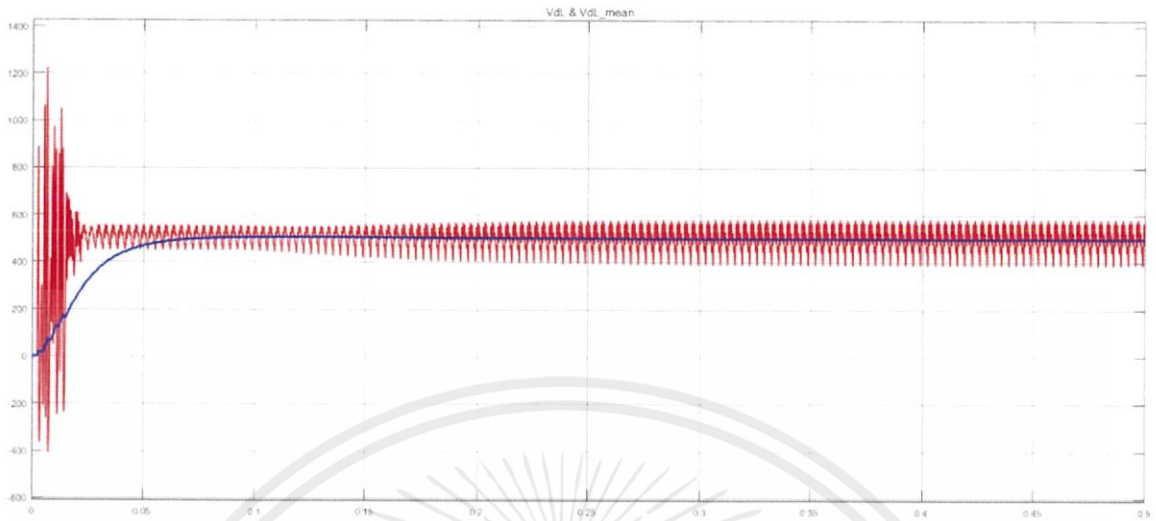


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

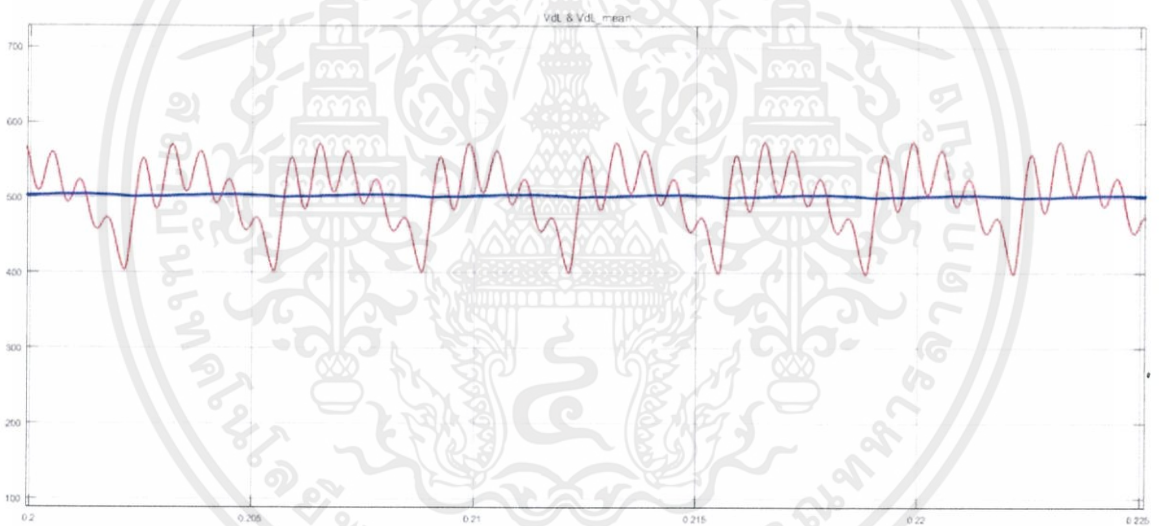


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

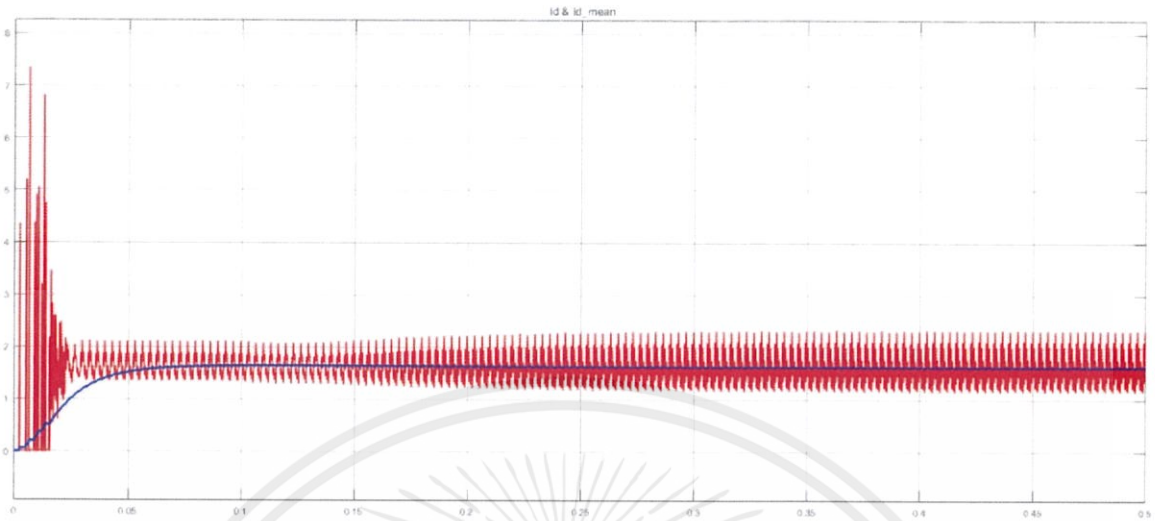
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร



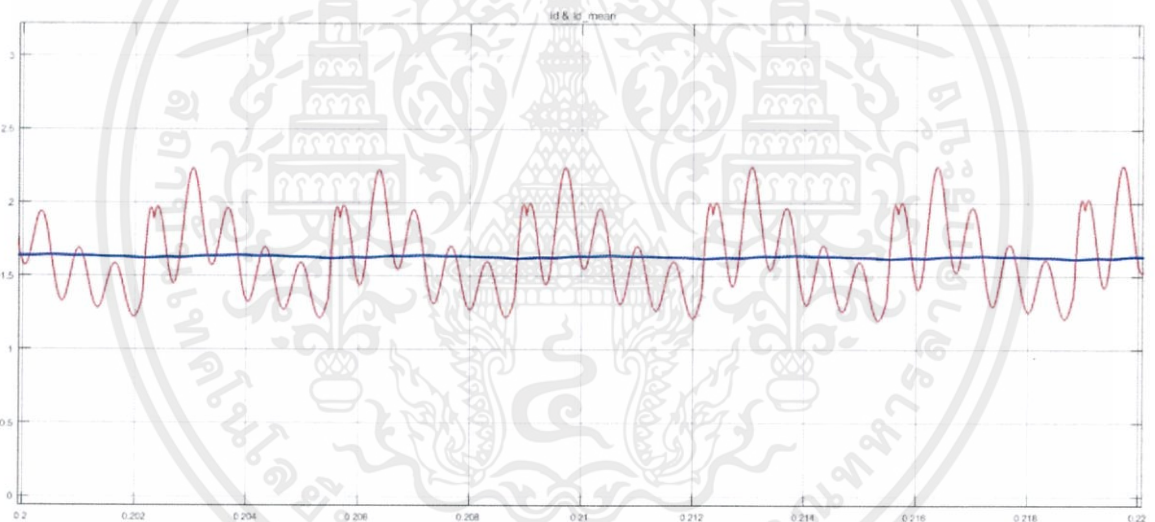
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

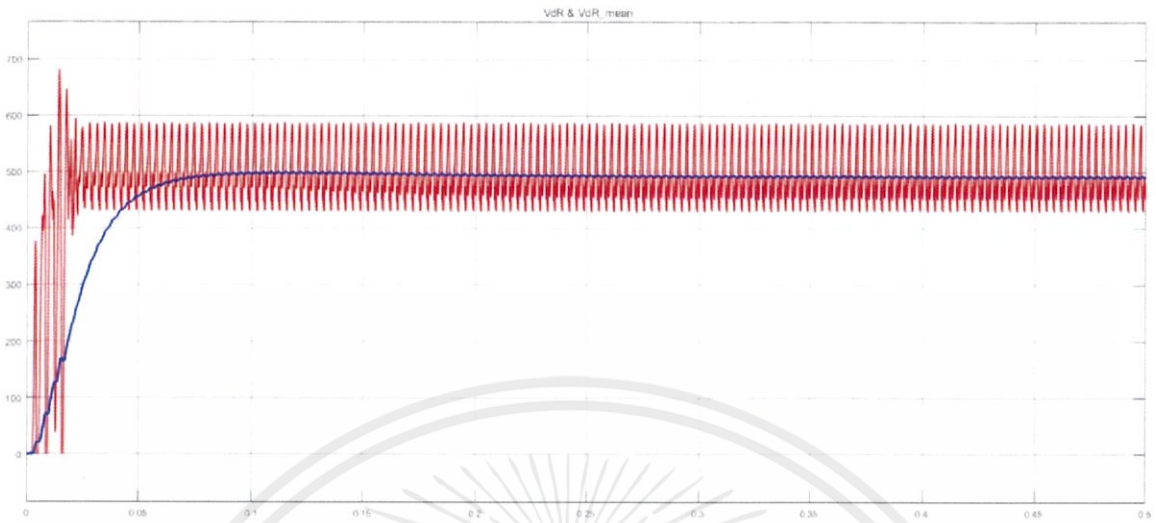


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

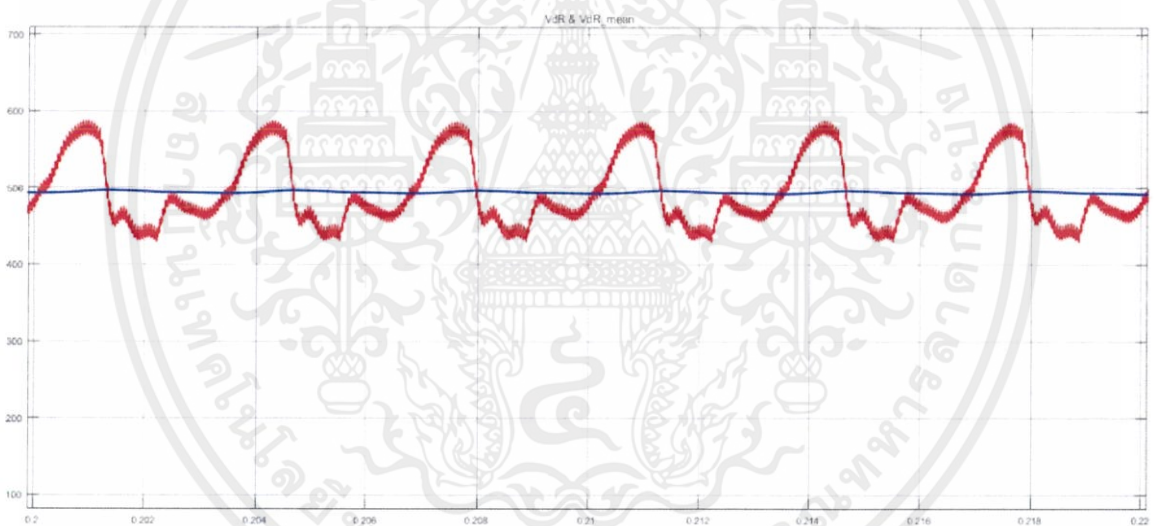


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

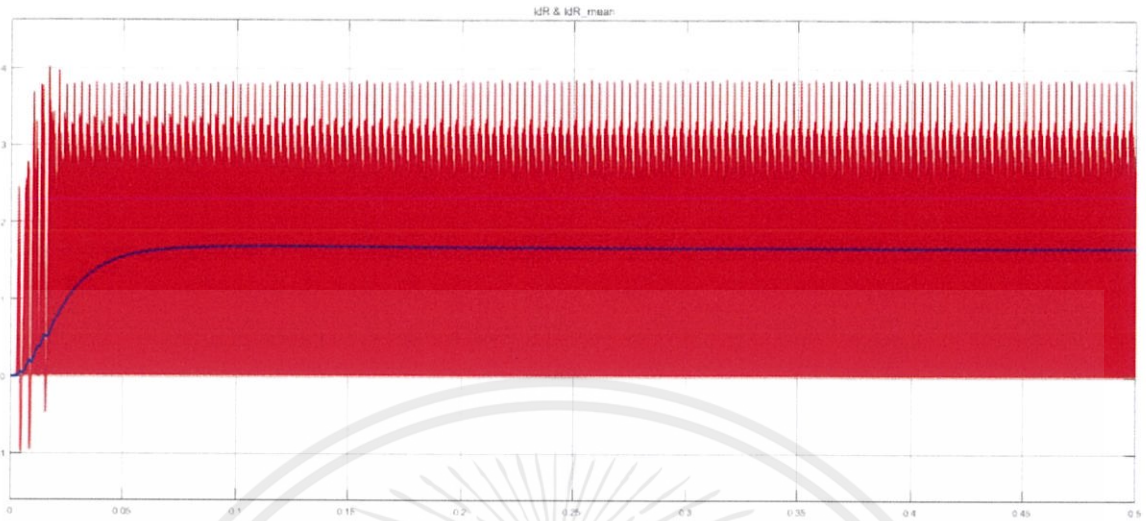


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

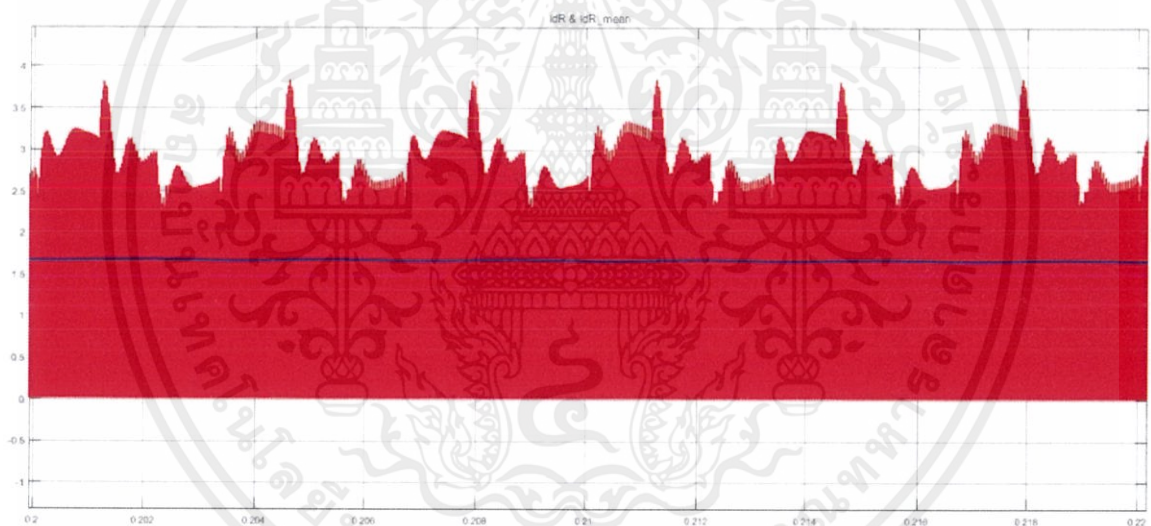


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

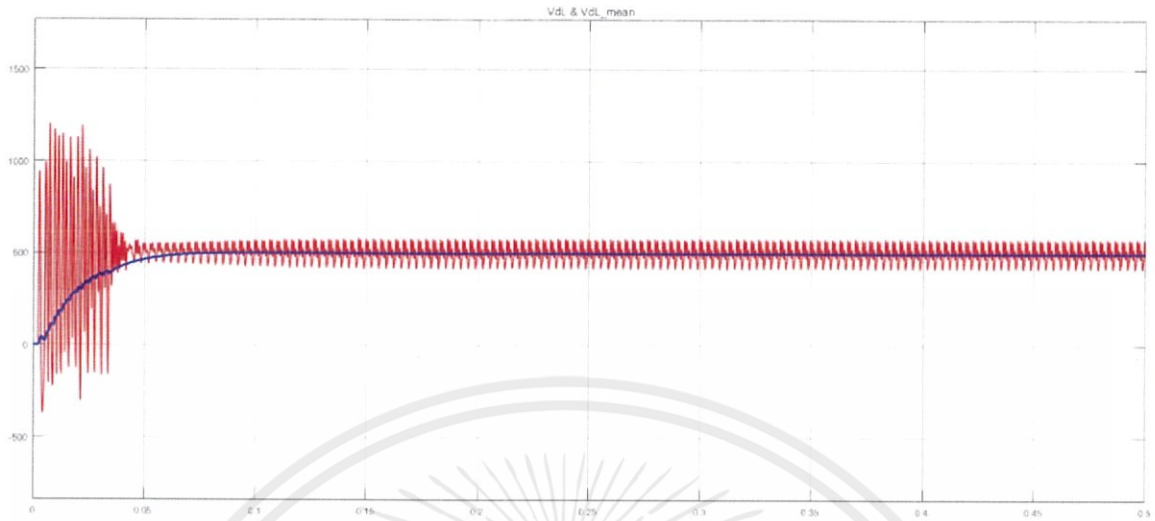


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

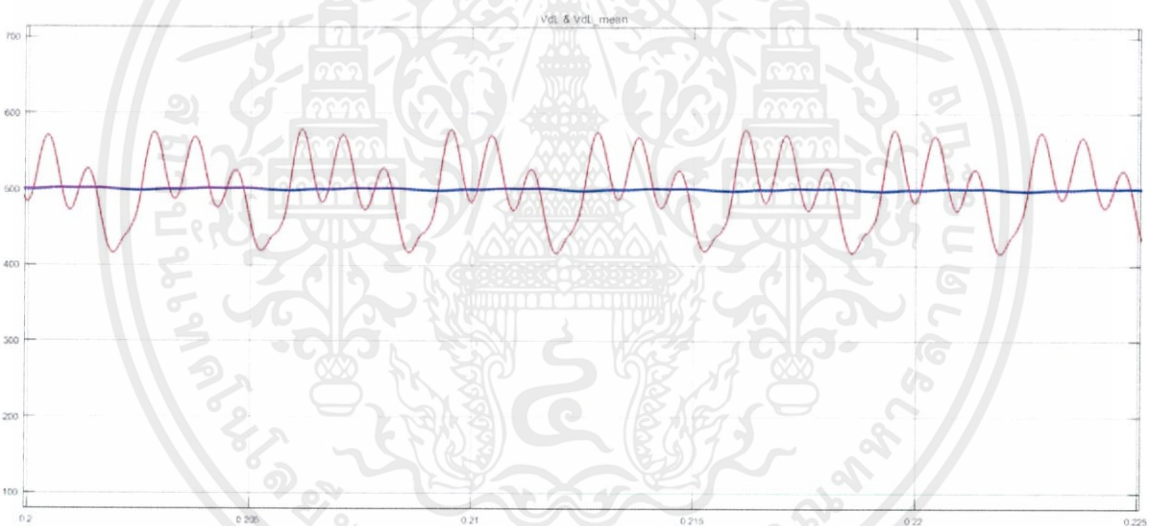


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

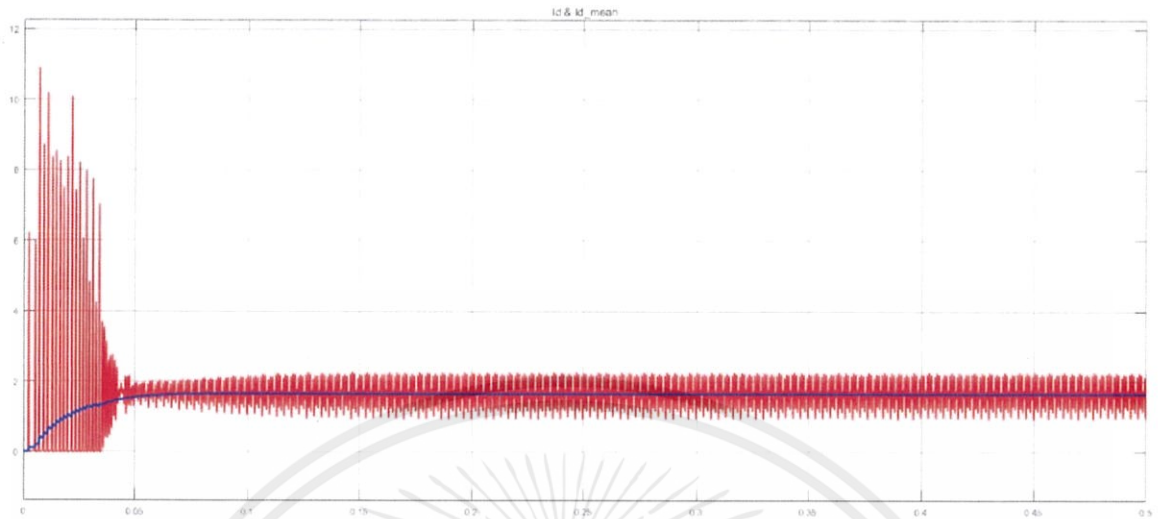
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร



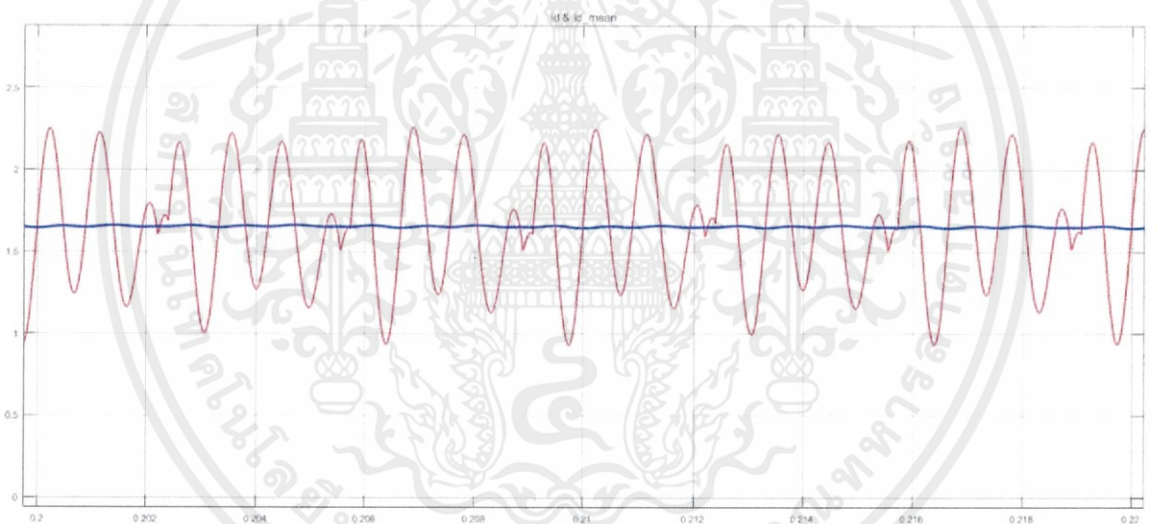
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว



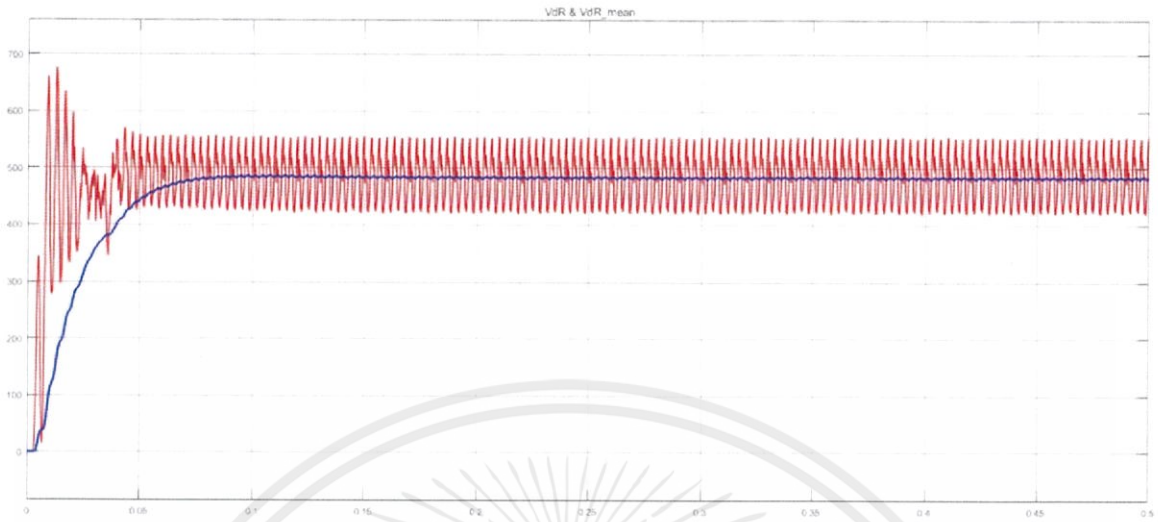
(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



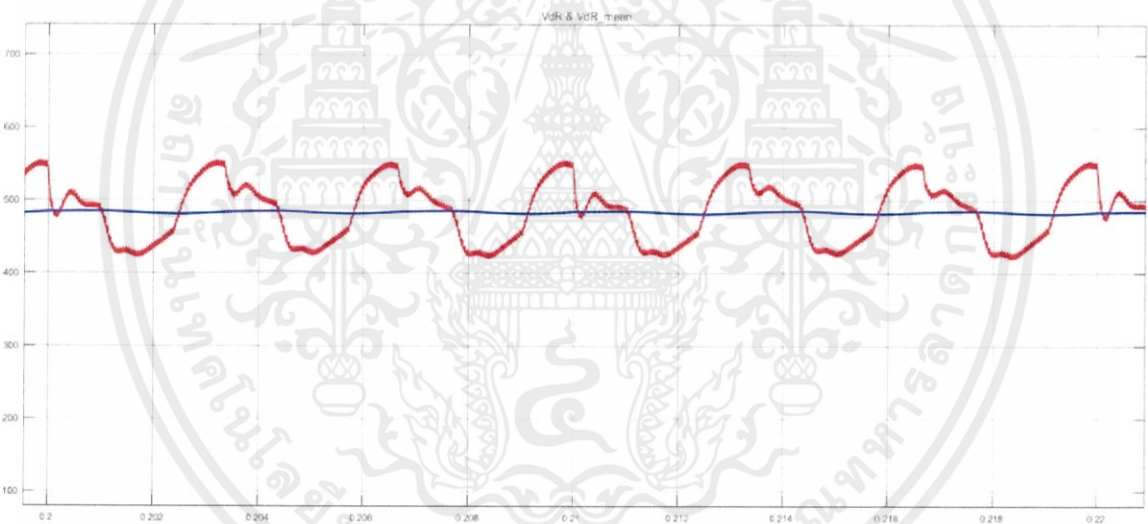
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

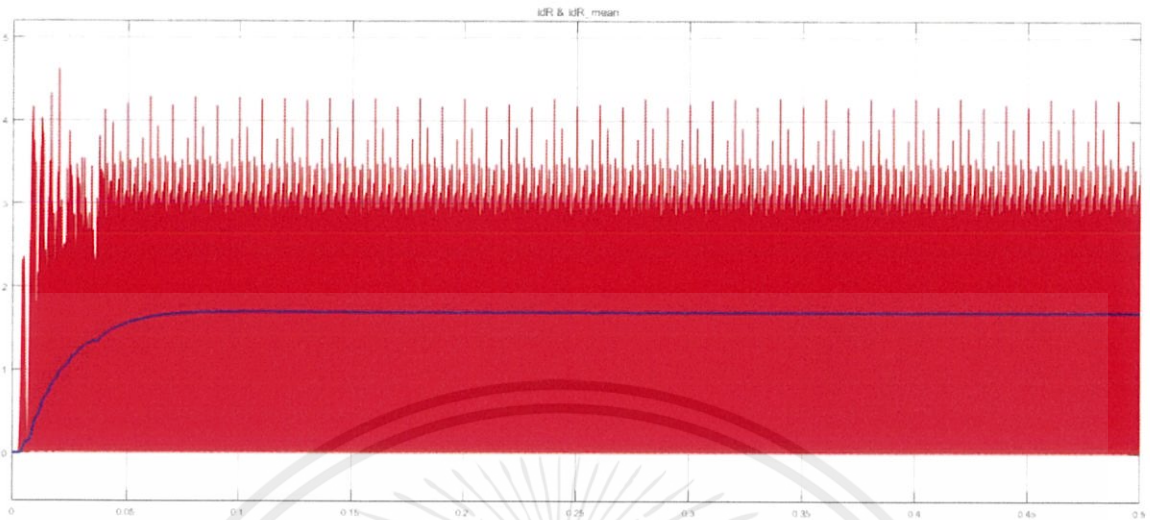


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

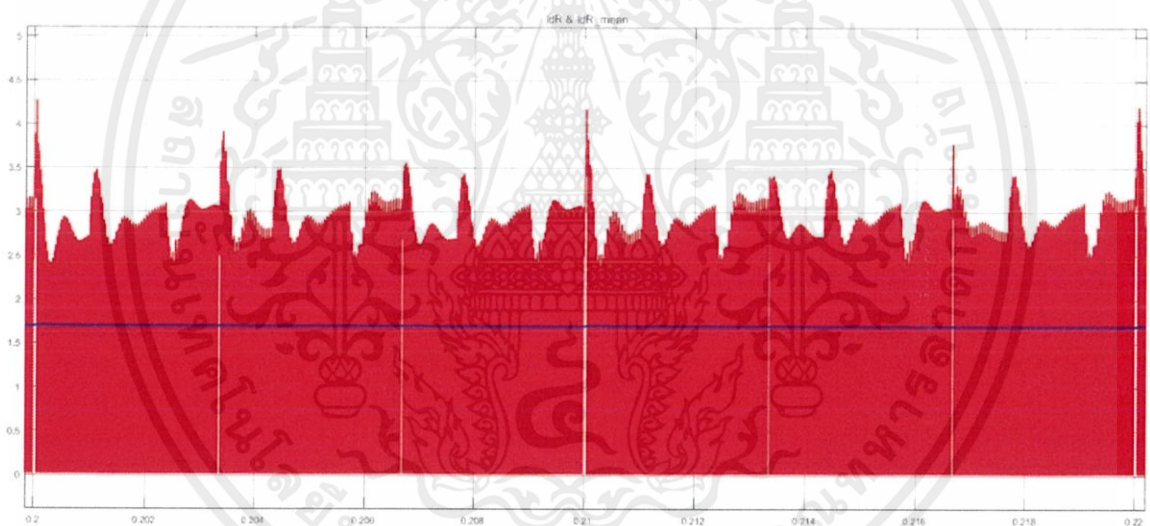


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะสายส่ง พิจารณารูปคลื่นแรงดันที่ระยะ 150 กิโลเมตร พบว่ารูปคลื่นที่สภาวะคงตัวจะมีการแกว่งเล็กน้อย และมีริบเปิดต่ำ เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งเป็น 300 กิโลเมตร พบว่ารูปคลื่นมีริบเปิดสูงขึ้น มีอัตราการแกว่งที่มากขึ้นและช่วงเวลากการแกว่งมากขึ้น และเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งเป็น 600 กิโลเมตร พบว่าแตกต่างเพียงช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสก่อนเข้าสายส่งกระแสตรง พบว่ามีแนวโน้มของอัตราการแกว่งและริบเปิดไปในทางเดียวกันกับของรูปคลื่นแรงดัน เมื่อพิจารณาที่ระยะสาย

ส่ง 150 กิโลเมตร พบว่ารูปคลื่นมีรีปเปิลต่ำ อัตราการแกว่งของรูปคลื่นน้อยและการแกว่งของรูปคลื่นมีความรุนแรงน้อย เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งเป็น 300 กิโลเมตร รูปคลื่นกระแสมีค่ารีปเปิลสูงขึ้น อัตราการแกว่งและความรุนแรงมากขึ้นกว่าระยะก่อนหน้า ที่ระยะสายส่ง 600 กิโลเมตร พบว่าอัตราการแกว่งที่ระยะนี้มีการจำนวนรูปคลื่นการแกว่งที่ลดลง แต่มีการแกว่งที่รุนแรงมากกว่าระยะอื่น เป็นสาเหตุให้ขนาดรีปเปิลของรูปคลื่นกระแสที่ระยะนี้มีมากกว่าระยะอื่น

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะสายส่ง พิจารณารูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง พบว่าที่ระยะ 150 กิโลเมตร รูปคลื่นมีรีปเปิลและการแกว่งที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ ที่ระยะ 300 กิโลเมตร รูปคลื่นแรงดันมีรีปเปิลที่น้อยลงเมื่อเทียบกับระยะก่อนหน้า มีการแกว่งที่ลดลง และที่ระยะ 600 กิโลเมตร รูปคลื่นแรงดันมีรีปเปิลและการแกว่งที่น้อยที่สุด เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสพบว่าเมื่อเพิ่มระยะสายส่งทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งลดลง

## 2. ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จำลองที่พิกัดโหลด 750 และ 1500 W

ผลการจำลองที่พิกัดโหลด 750 W แสดงดังตารางที่ 4.5 – 4.7 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง กระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.15

ผลการจำลองที่พิกัดโหลด 1500 W แสดงดังตารางที่ 4.5 – 4.7 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.5 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัตต์ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านหัตถิยภูมิและเรคตีไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)	
		750	1500
แรงดันไลน์ AB	V	377.2	374.8
แรงดันไลน์ BC	V	377.2	374.8
แรงดันไลน์ CA	V	377.2	374.8
กระแสเฟส A	A	1.298	2.662
กระแสเฟส B	A	1.303	2.660
กระแสเฟส C	A	1.299	2.662
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	278.2	572.6
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	279.2	572.4
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	278.1	572.7
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	50.13	61.46
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	50.77	61.06
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	51.47	60.97

ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อส่งจ่ายไฟฟ้าที่พิกัดโหลดสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าทางด้านหม้อแปลงหัตถิยภูมิมีค่าลดลงเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดันตก ส่วนกระแสในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดสูงขึ้น โดยพิกัดโหลด 750 W วัตต์ค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้ 1.298 A และที่พิกัดโหลด 1500 W ค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A เพิ่มขึ้นเป็น 2.662 A ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนมีเพิ่มขึ้นด้วย แต่กำลังไฟฟ้าเสมือนเพิ่มขึ้นไม่มาก โดยที่พิกัดโหลด 750 W วัตต์ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้ 278.2 W และ 50.13 var ตามลำดับ และที่พิกัดโหลด 1500 W วัตต์ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้เพิ่มขึ้นมาเป็น 572.6 W และ 61.46 var ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)	
		750	1500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	500.0	501.8
แรงดันขาออกสายส่ง	V	483.3	467.3
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.653	3.405
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.698	3.447
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	827.5	1709
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	816.7	1597

จากตารางที่ 4.6 ปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้าสายส่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.4 นั่นคือแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่ 750 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.653 A และ 827.5 W ตามลำดับ และที่โหลด 1500 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 3.405 A และ 1709 W ตามลำดับ และเมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าบริเวณปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่ 750 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 483.3 V และที่โหลด 1500 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 467.3 V ส่วนกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่โหลด 750 W ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 1.698 A และ 816.7 W ตามลำดับ และที่พิกัดโหลด 1500 W ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 3.447 A และ 1597 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)	
		750	1500
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	219.5	219.8
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	218.6	219.7
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	219.6	220.1
กระแสเฟส AB	A	1.134	2.271
กระแสเฟส BC	A	1.129	2.269
กระแสเฟส CA	A	1.134	2.274
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	248.9	499.3
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	246.8	498.5
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	249.0	500.5
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0

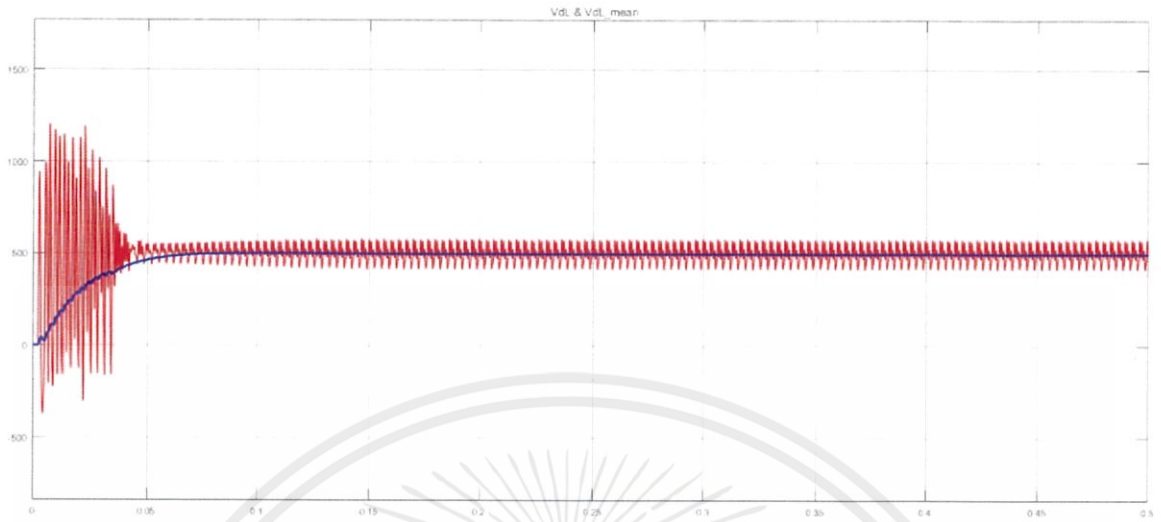
ตารางที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีค่าใกล้เคียงพิกัดแรงดัน ทำให้โหลดดึงกำลังไฟฟ้าจริงสามเฟสได้ใกล้เคียงกับค่าพิกัดโหลด ที่โหลด 750 W วัดค่าแรงดันไลน์ กระแสเฟส AB และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 219.5 V 1.134 A และ 248.9 W ตามลำดับ และที่พิกัดโหลด 1500 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ กระแสเฟสไฟฟ้าเฟส AB และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 219.8 V 2.271 A และ 499.3 W ตามลำดับ พบว่ากระแสและกำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

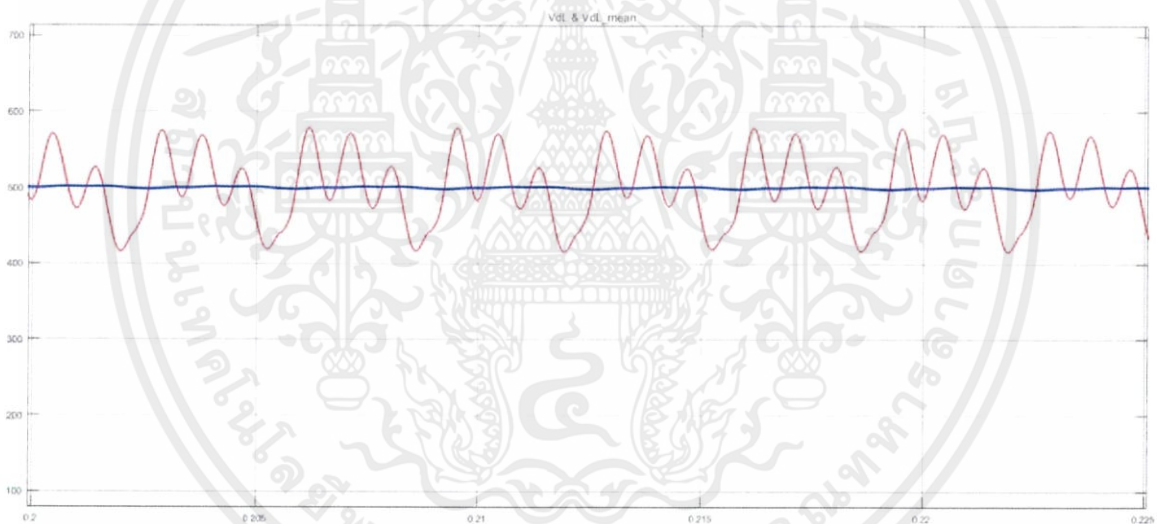
พิกัดโหลด (W)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
750	835.5	827.5	816.7	744.7
1500	1717.7	1709.0	1597.0	1498.3

จากตารางที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 และ 8.7 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.8 และ 112 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 72 และ 98.7 W ตามลำดับ จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลดเกิดขึ้นกับสายส่ง

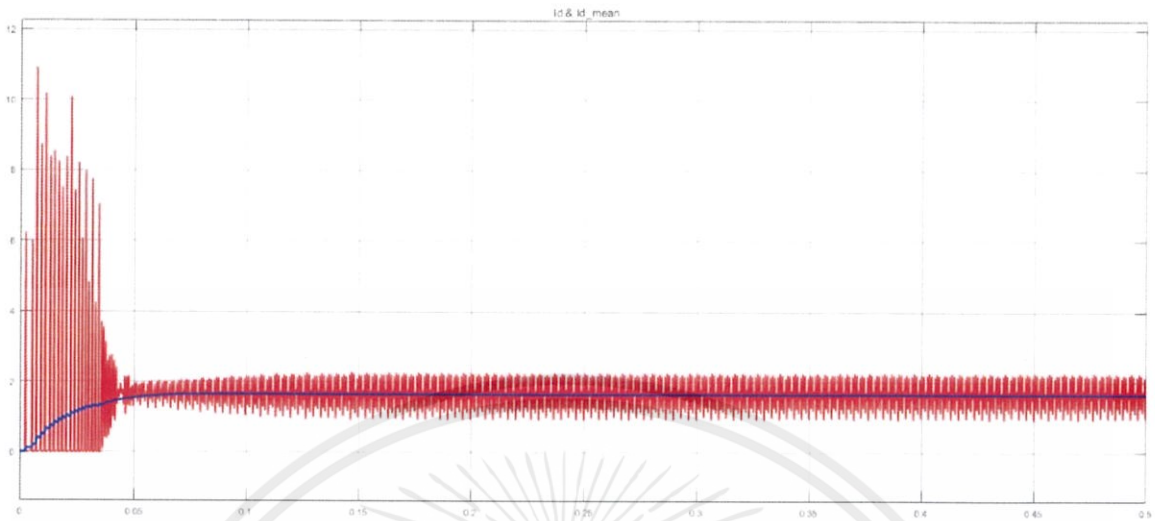
จากผลการจำลองที่พิกัดโหลด 750 W เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.14% เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 1.04% และโหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 98.96% ที่พิกัดโหลด 1500 W ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 6.88% เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 6.55% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 93.45% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดโหลดสูงขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์แรงดันตกที่เกิดในสายส่งเพิ่มขึ้น และหากไม่ปรับ Modulation index ของอินเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันขาออก โหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าลดลงอย่างมาก



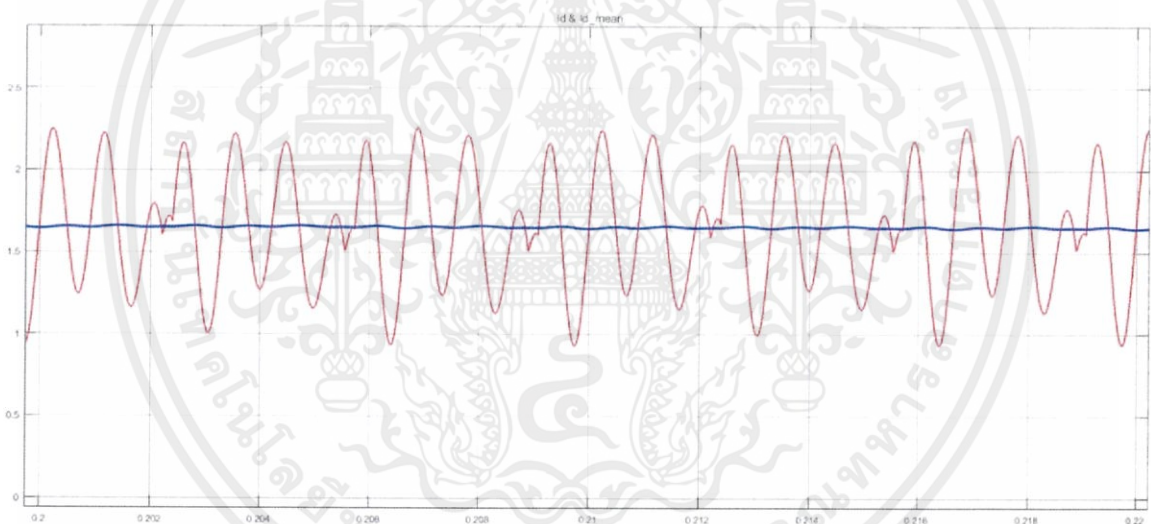
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

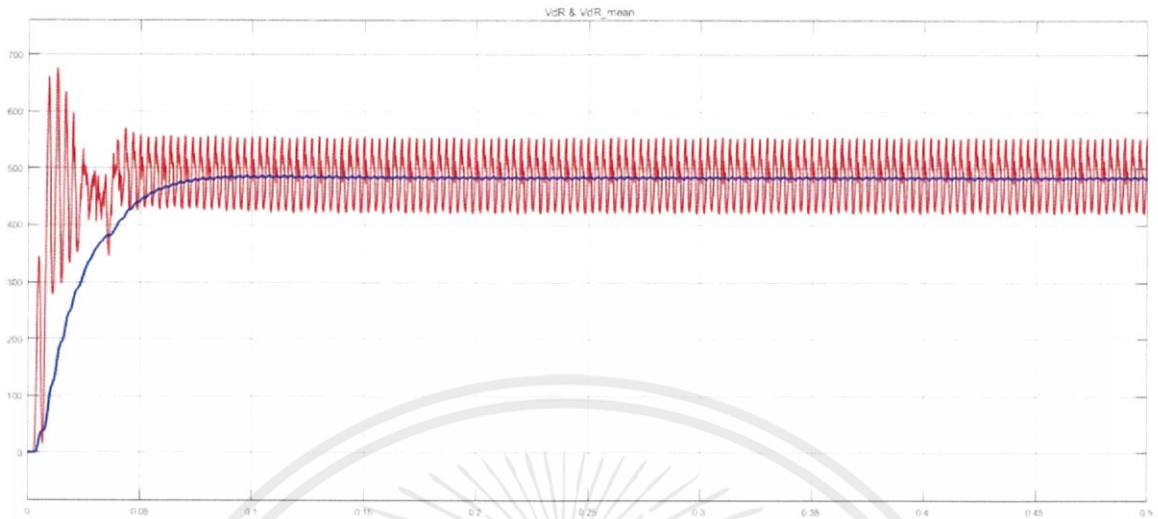


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

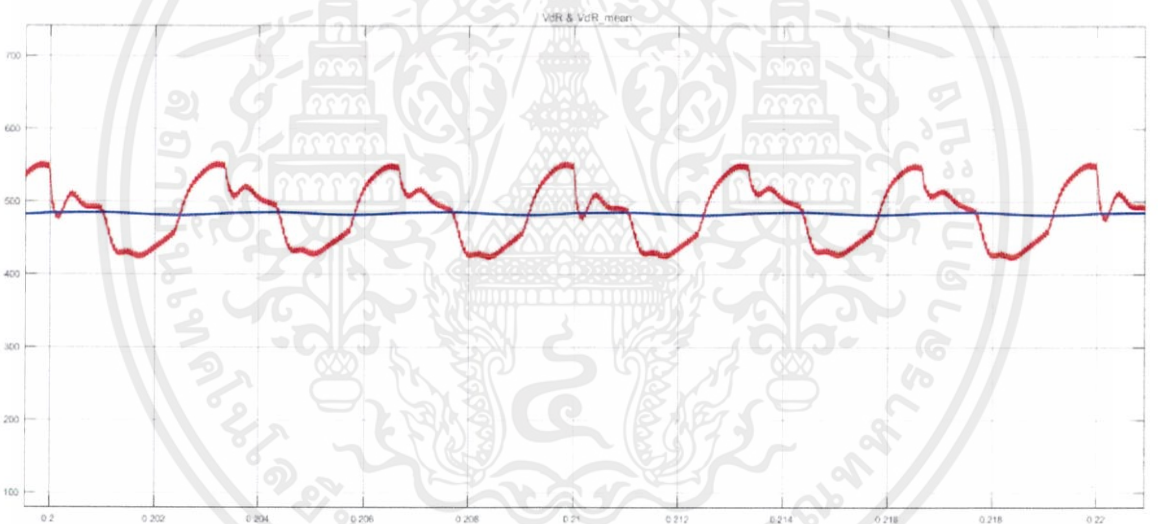


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

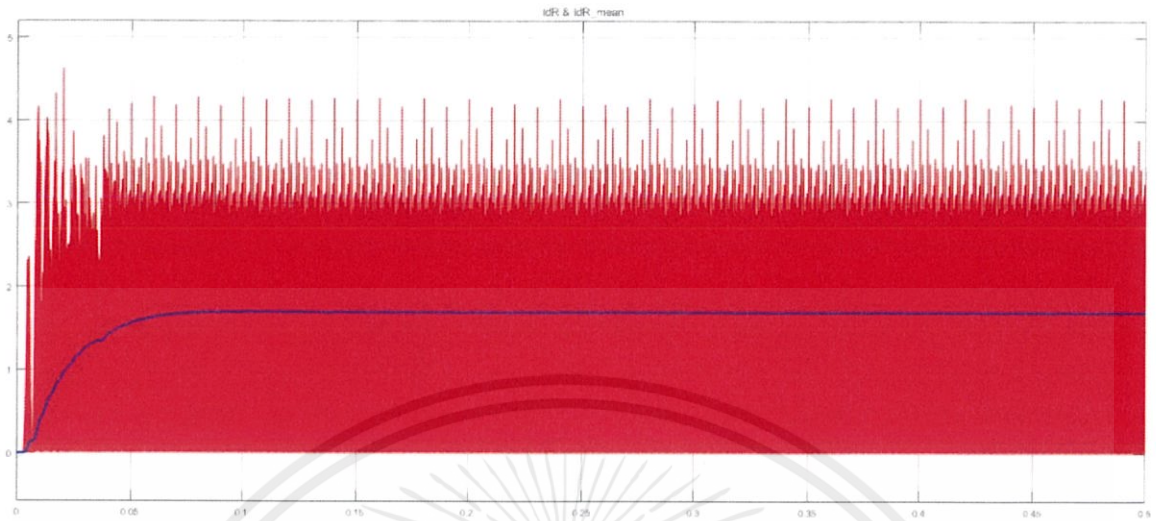


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

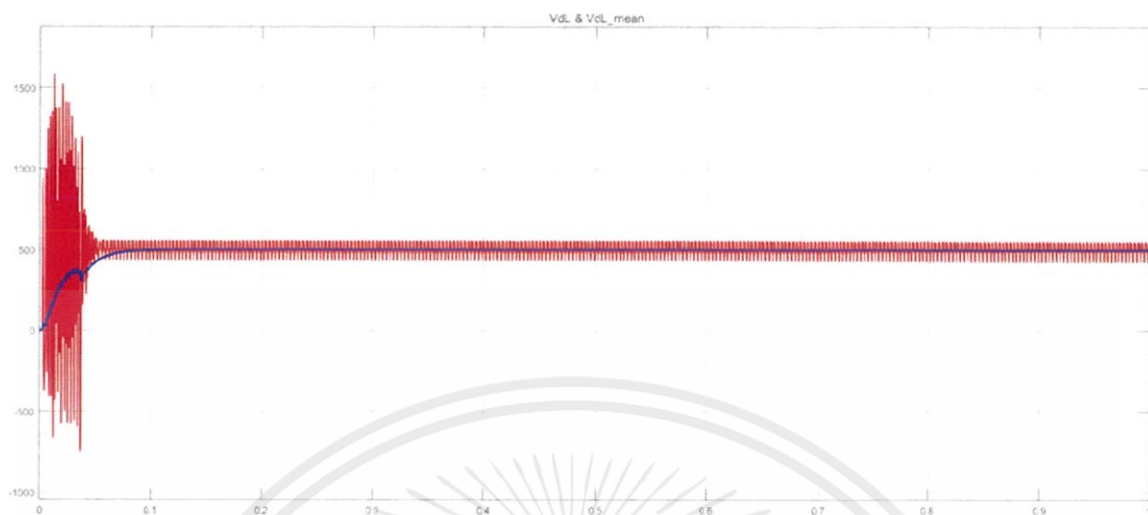


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

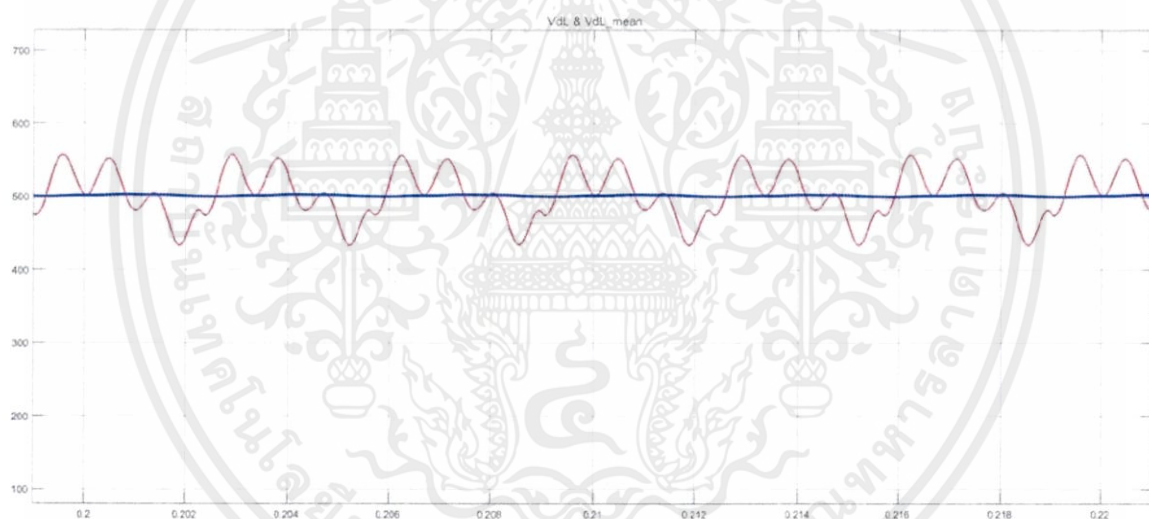


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

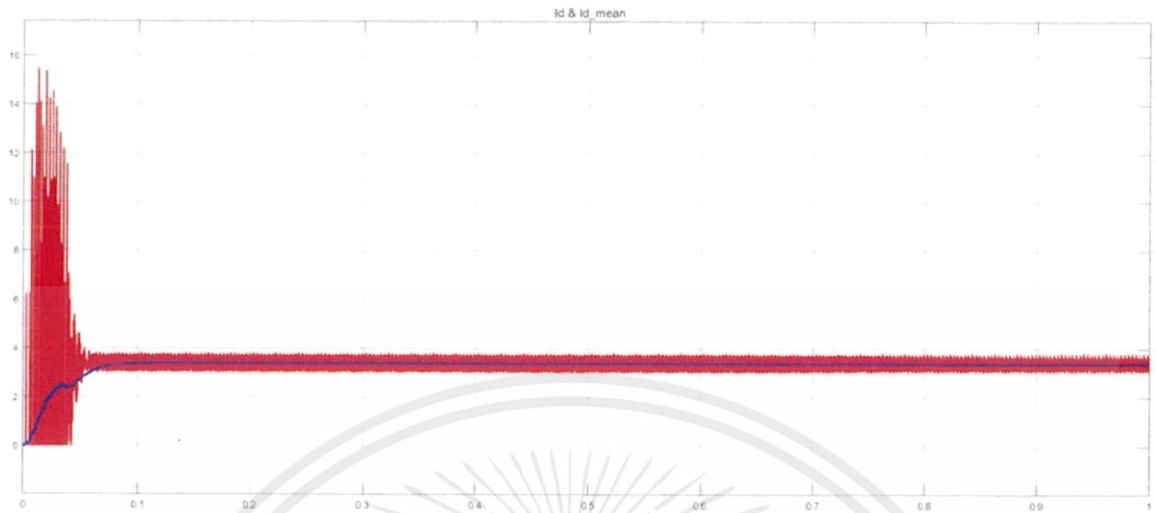


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

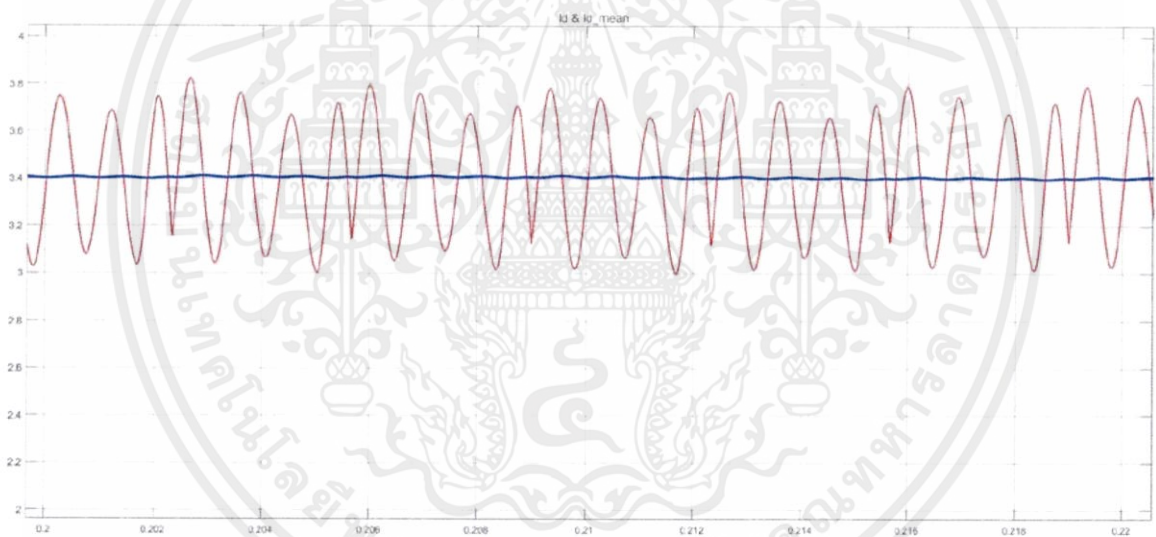


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

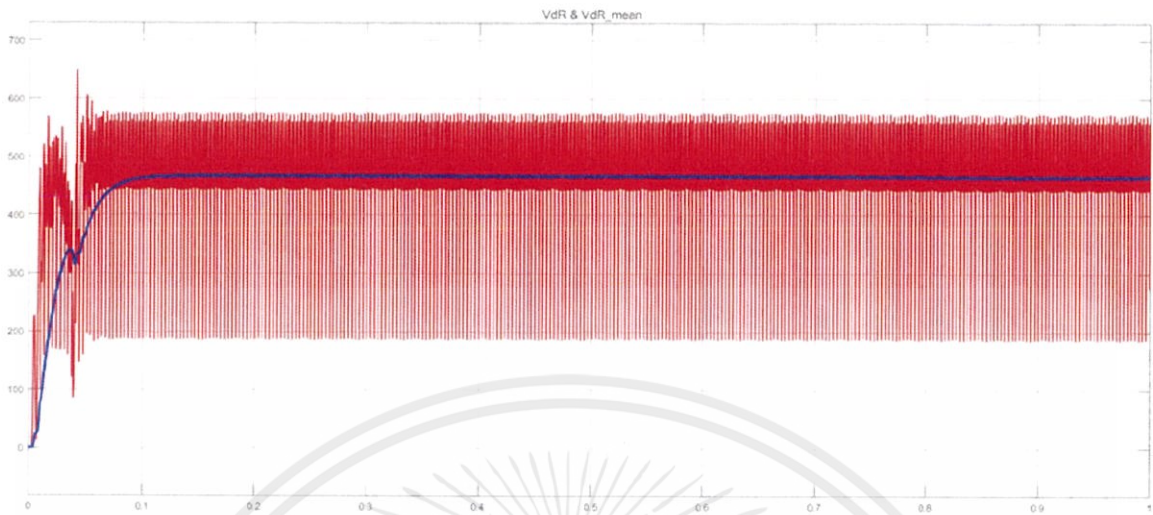


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

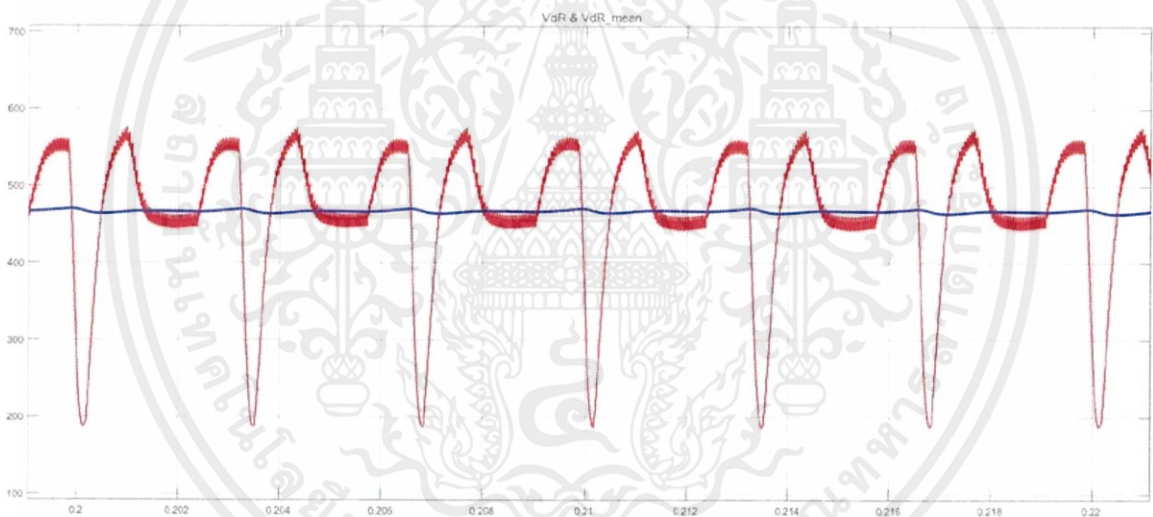


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

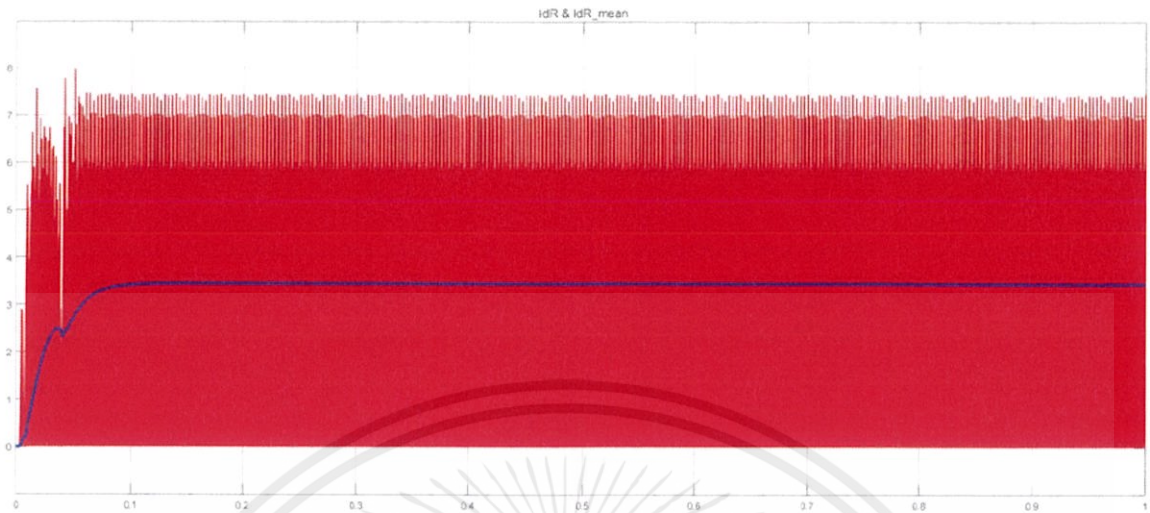


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

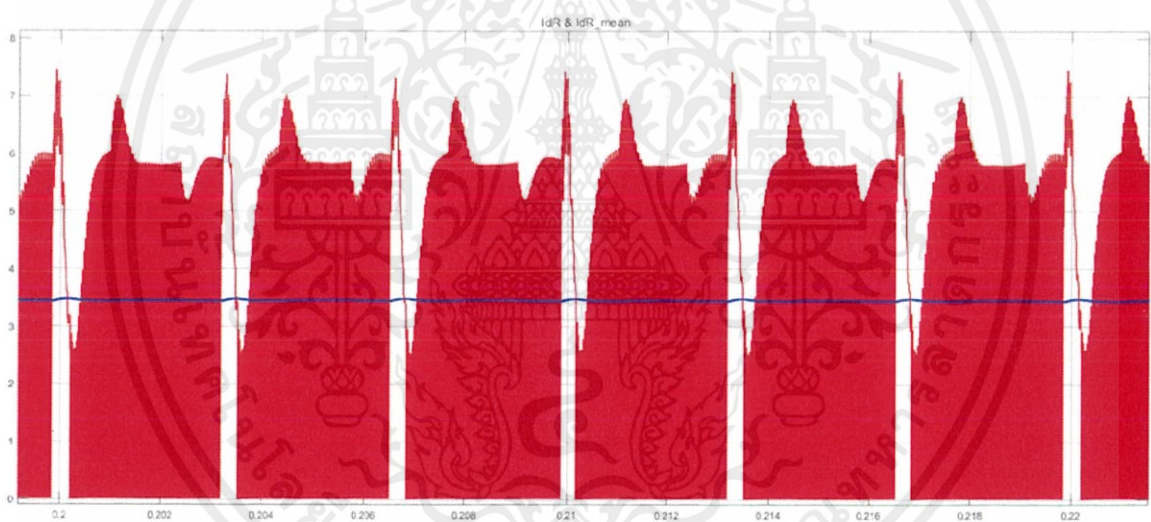


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดโหลด 750 W รูปคลื่นมีริบเปิลและอัตราการแกว่งสูง แต่มีช่วงเวลาของการแก่งน้อยกว่าพิกัดโหลดอื่น ที่พิกัดโหลด 1500 W รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งลดลง รวมทั้งมีค่าริบเปิลของรูปคลื่นต่ำลง แต่มีช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสขาเข้าพบว่า ที่พิกัดโหลด 750 W รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งต่ำ แต่แกว่งรุนแรง ทำให้ให้รูปคลื่นมีค่าริบเปิลสูง ที่

พิกัดโหลด 1500 W พบว่ารูปคลื่นมีอัตราการแกว่งที่เพิ่มขึ้น แต่มีความรุนแรงของการแกว่งที่ลดลง ส่งผลให้รูปคลื่นมีขนาดของริบเบิลต่ำลง

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดโหลด 750 W รูปคลื่นมีการแกว่งรุนแรง อัตราการแกว่งต่ำ ที่พิกัดโหลด 1500 W รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งและความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันมีค่าริบเบิลสูง เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสพบว่า ที่โหลด 750 W มีช่วงเวลาของการแกว่งมากกว่าที่พิกัดโหลด 1500 W

### 3. ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน จำลองที่พิกัดแรงดัน 450 และ 500 V ผลการจำลองที่พิกัดแรงดัน 450 V แสดงดังตารางที่ 4.9-4.11 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.19

ผลการจำลองที่พิกัดแรงดัน 500 V แสดงดังตารางที่ 4.9-4.11 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.9 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และเรกติไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันไลน์ AB	V	376.0	217.8
แรงดันไลน์ BC	V	375.9	217.8
แรงดันไลน์ CA	V	376.0	217.8
กระแสเฟส A	A	1.484	1.298
กระแสเฟส B	A	1.488	1.303
กระแสเฟส C	A	1.482	1.299
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	295.9	278.2
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	296.0	279.2
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	294.9	278.1
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	128.7	50.13
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	129.8	50.77
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	129.2	51.47

ตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่ากระแสในแต่ละเฟสมีค่าลดลงเมื่อแรงดันในสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันขาเข้าสายส่ง 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้ 1.484 A และที่แรงดันขาเข้าสายส่ง 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ลดลงเหลือ 1.298 A เมื่อกระแสลดลงทำให้ความสูญเสียที่เกิดในสายส่งลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบต้องจ่ายลดลงด้วย โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้ 295.9 W และ 128.7 var ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้ 278.2 W และ 50.13 var ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	450.0	500.0
แรงดันขาออกสายส่ง	V	434.6	483.3
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.871	1.653
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.906	1.698
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	850.0	827.5
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	819.4	816.7

แรงดันขาเข้าสายส่งมีค่า 450 V และ 500 V โดยกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.871 A และ 850 W ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.653 A และ 827.5 W ตามลำดับ และเมื่อมาวัดปริมาณไฟฟ้าบริเวณปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ทางด้านขาเข้า และเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมสายส่งมีค่าน้อยลงเมื่อแรงดันด้านขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่าแรงดันขาออกได้เท่ากับ 434.6 V และที่แรงดัน 500 V วัดค่าแรงดันขาออกได้เท่ากับ 483.3 V โดยกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกำลังไฟฟ้าขาออก ที่แรงดัน 450 V และที่ 500 V มีค่าลดลง โดยที่ แรงดัน 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.906 A และ 819.4 W ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.698 A และ 816.7 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัตต์โหลด

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	219.9	219.5
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	218.8	218.6
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	220.1	219.6
กระแสเฟส AB	A	1.136	1.134
กระแสเฟส BC	A	1.130	1.129
กระแสเฟส CA	A	1.137	1.134
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	249.8	248.9
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	247.3	246.8
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	250.2	249.0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0

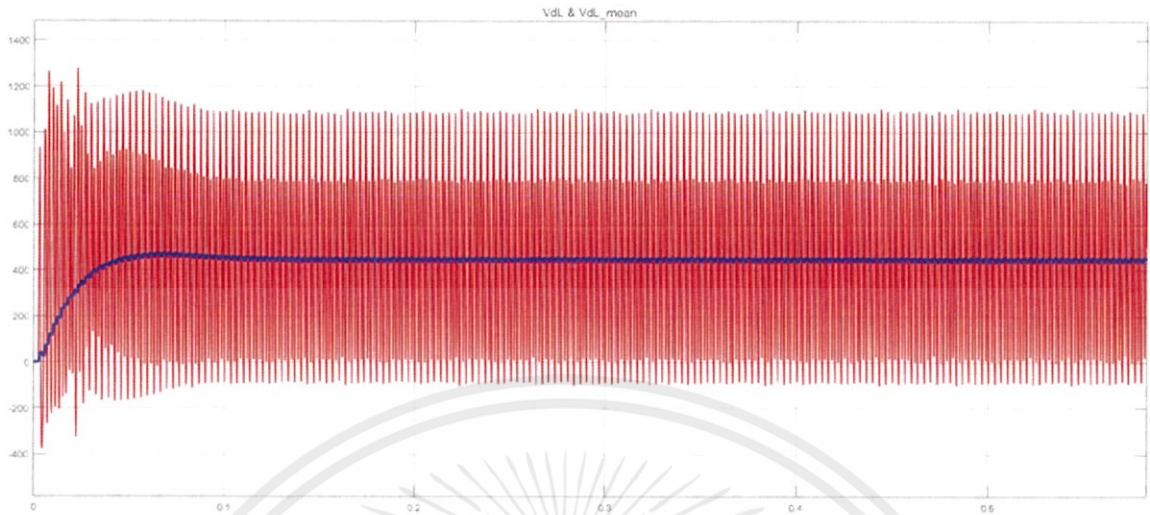
ปริมาณไฟฟ้าทั้งแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหลดมีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส AB กระแสไฟฟ้าเฟส AB และกำลังไฟฟ้าจริงเฟส A ได้เท่ากับ 219.9 V 1.136 A และ 249.8 W ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส AB กระแสไฟฟ้าเฟส AB และกำลังไฟฟ้าจริงเฟส A ได้เท่ากับ 219.5 V 1.134 A และ 248.9 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน

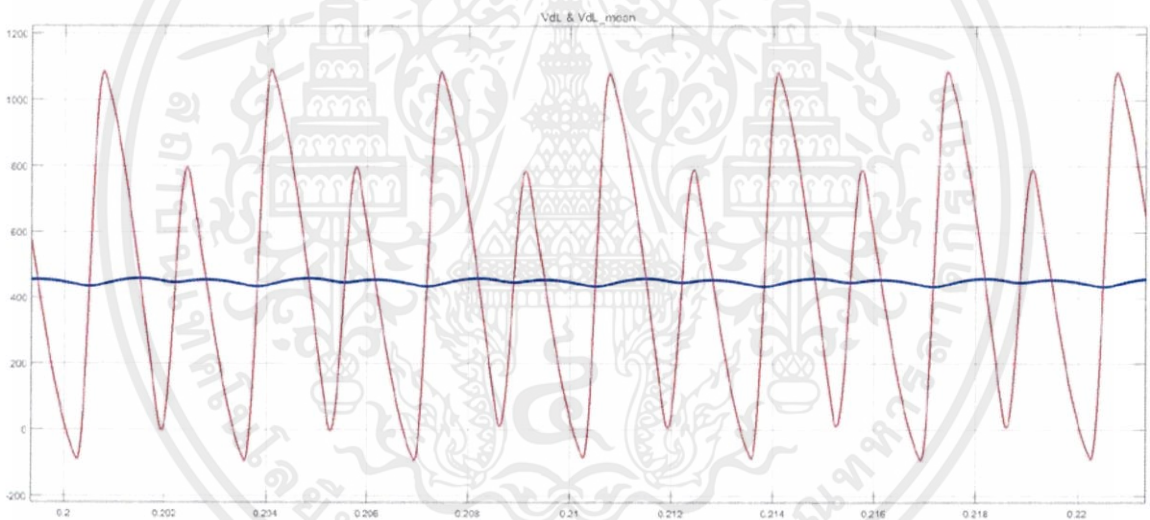
พิกัดแรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
450	886.8	850.0	819.4	747.3
500	835.5	827.5	816.7	744.7

จากตารางที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.8 และ 8 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าลดลงเมื่อพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้นเท่ากับ 30.6 และ 10.8 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีเกือบคงที่เท่ากับ 72.1 และ 72 W ตามลำดับ จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันเกิดขึ้นกับเรกติไฟเออร์

จากผลการจำลองที่พิกัดแรงดัน 450 V ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.42% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 96.4% และที่พิกัดแรงดัน 500 V ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.34% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 98.69% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดแรงดันสูงขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกที่เกิดในสายส่งลดลง โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น

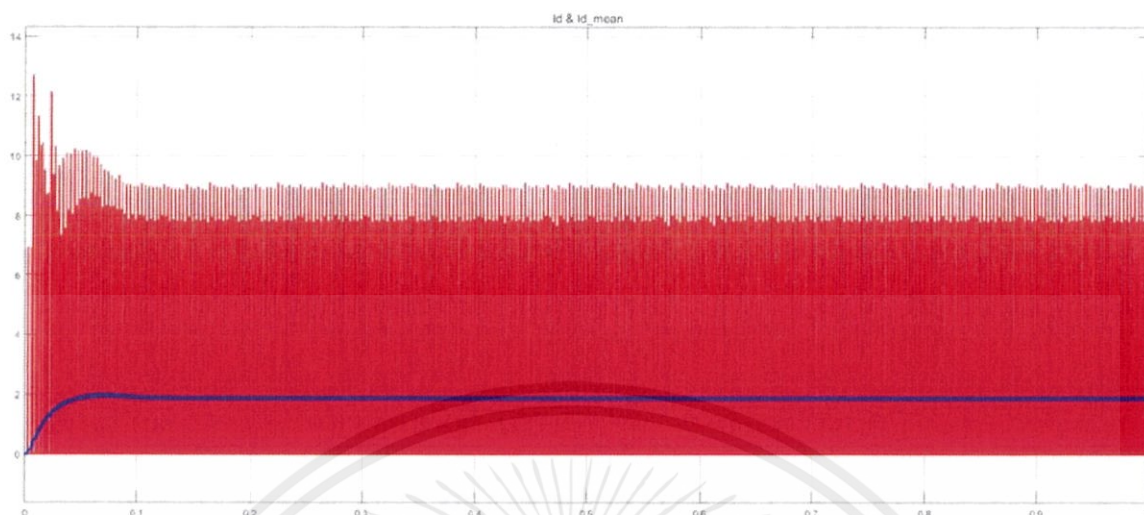


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

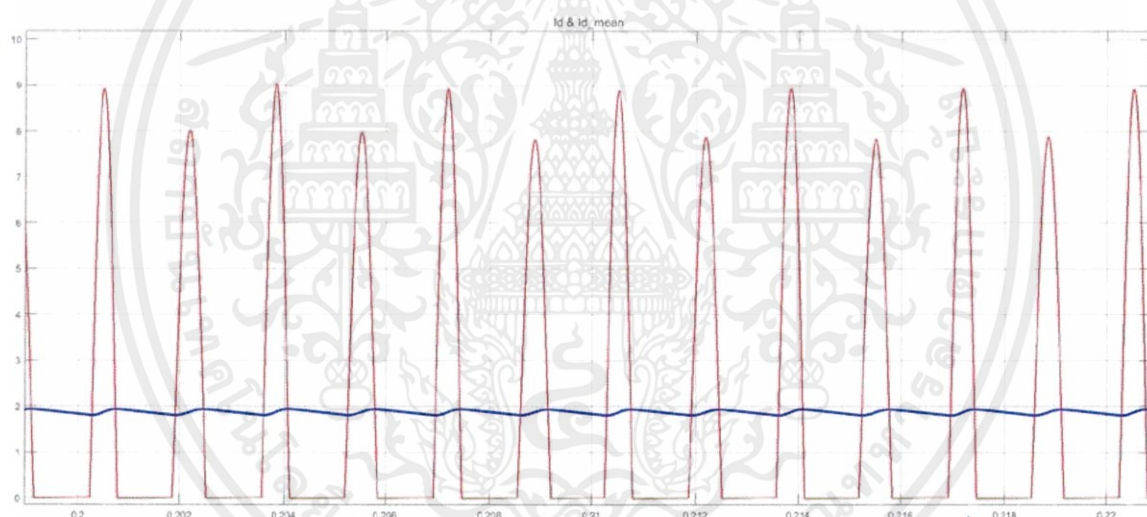


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

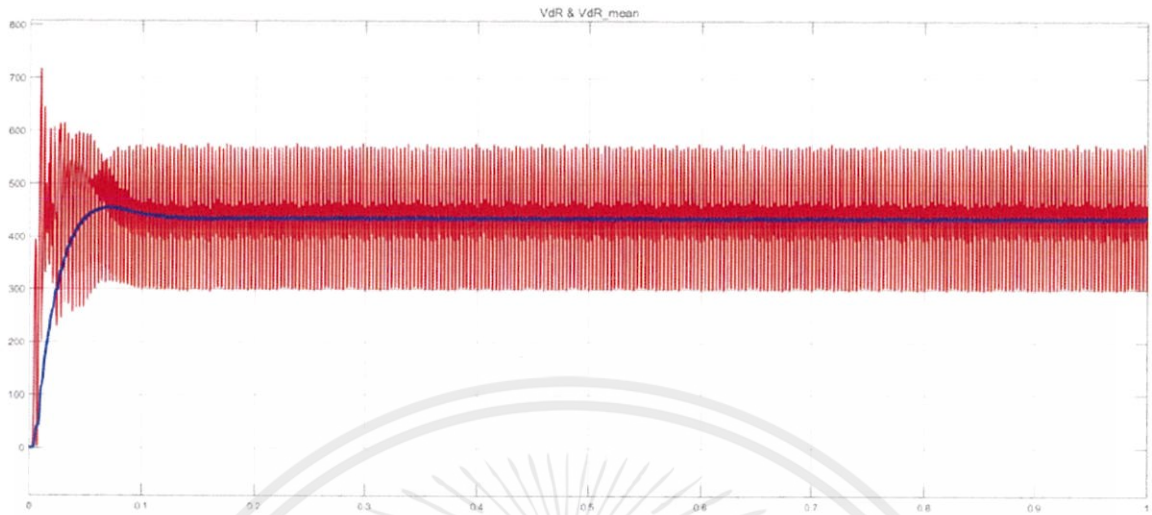


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

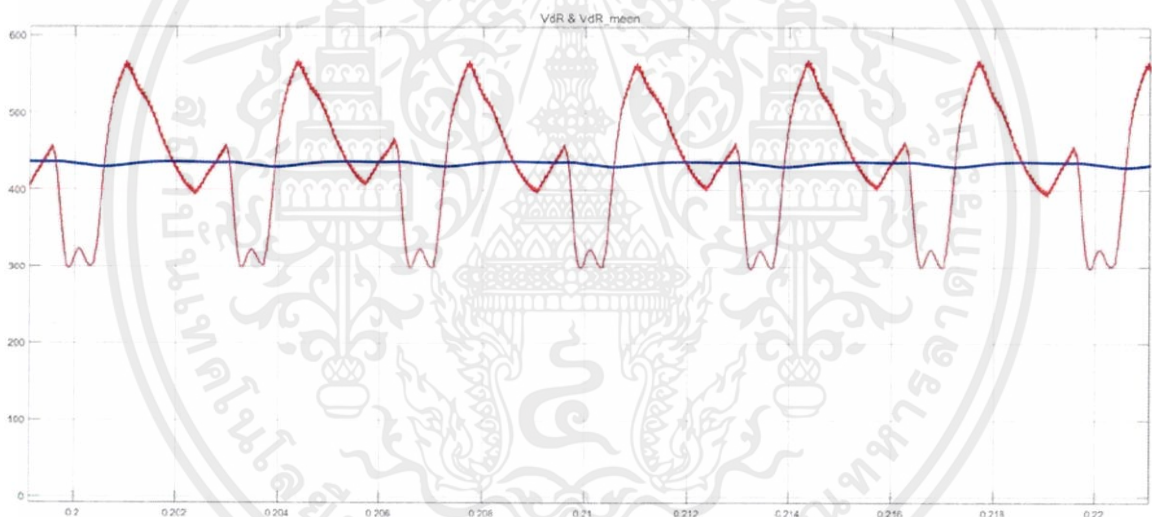


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

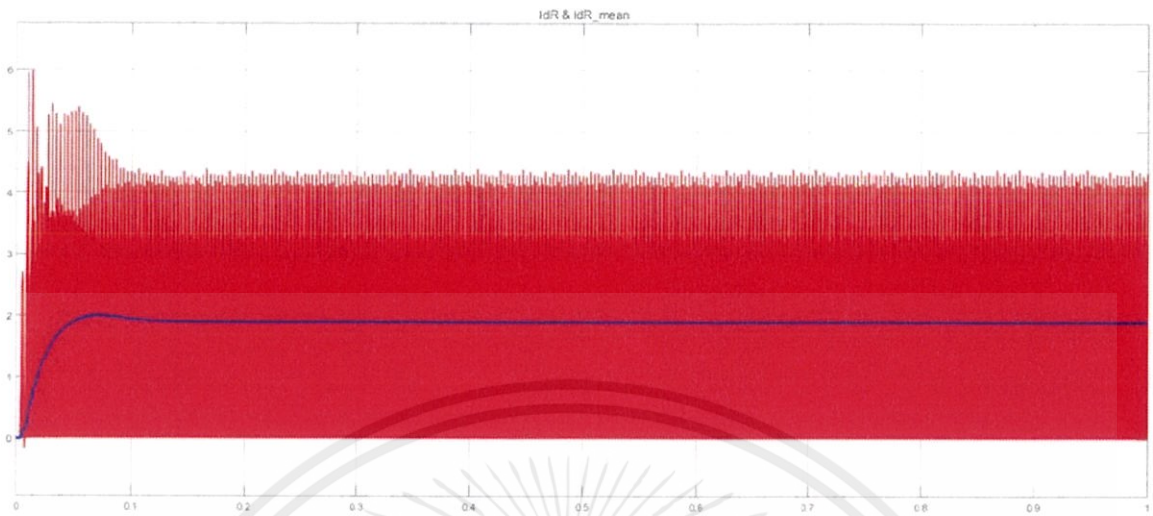


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

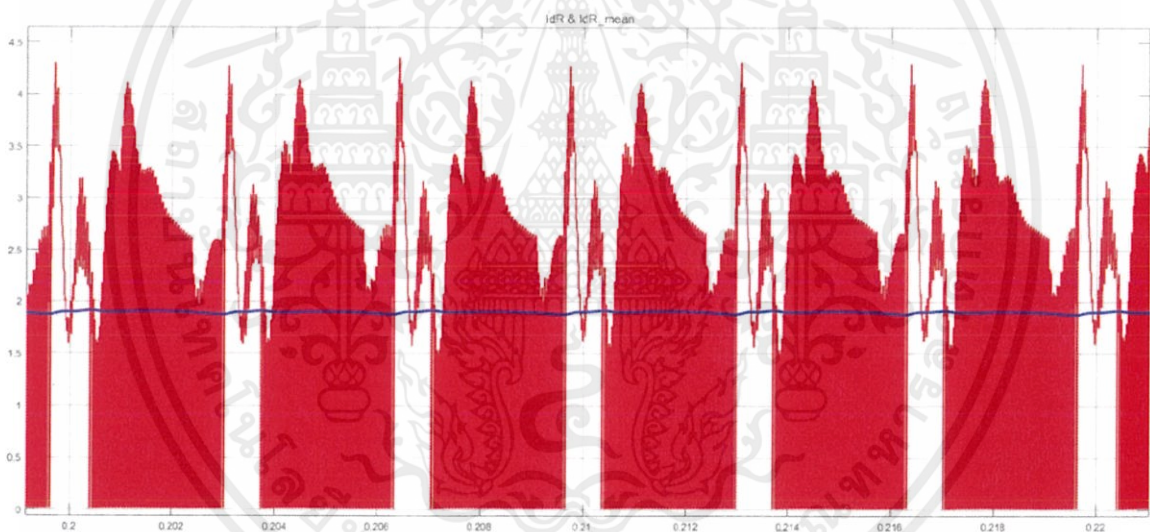


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

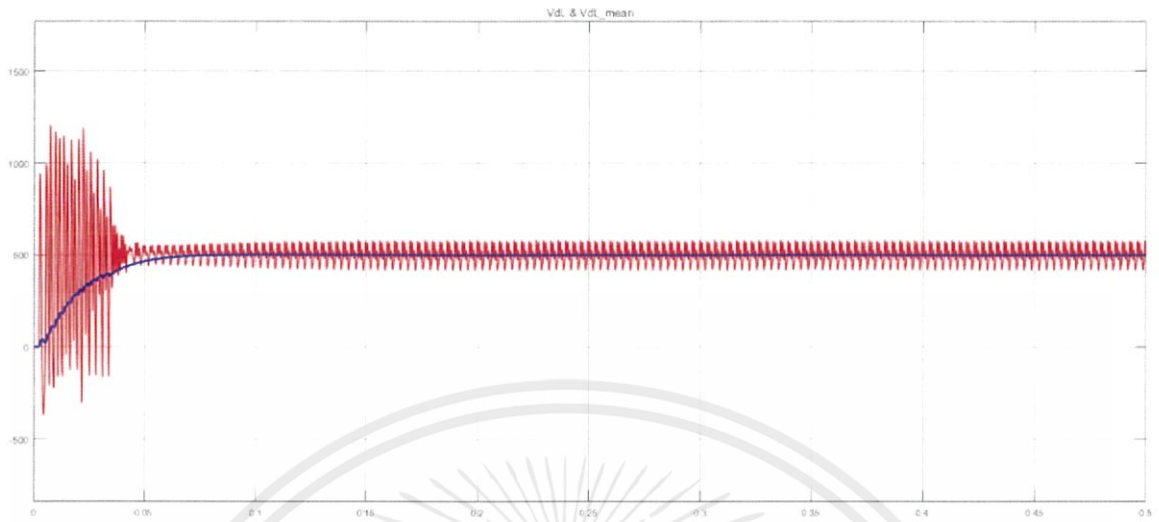


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

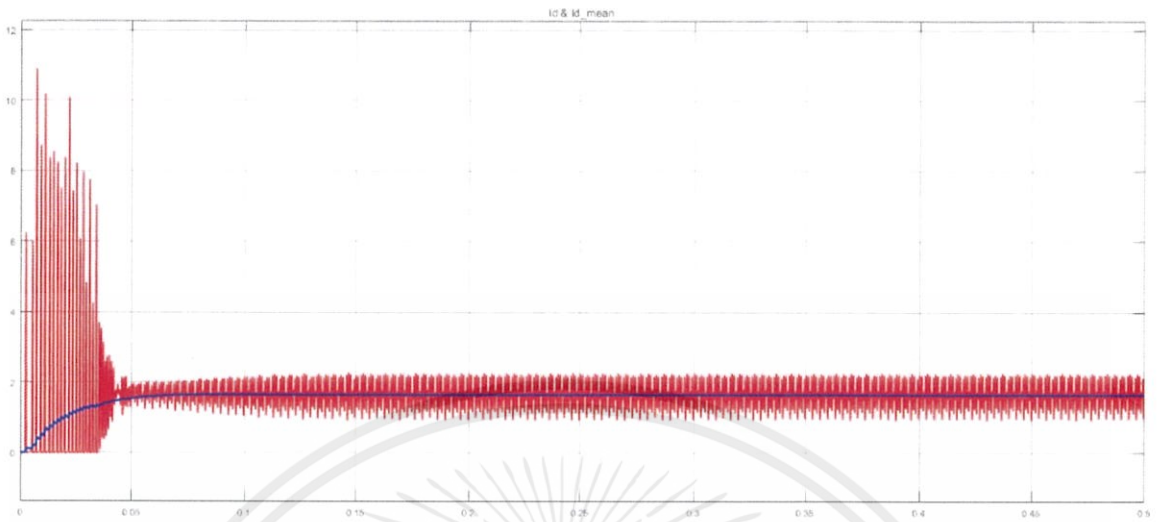


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

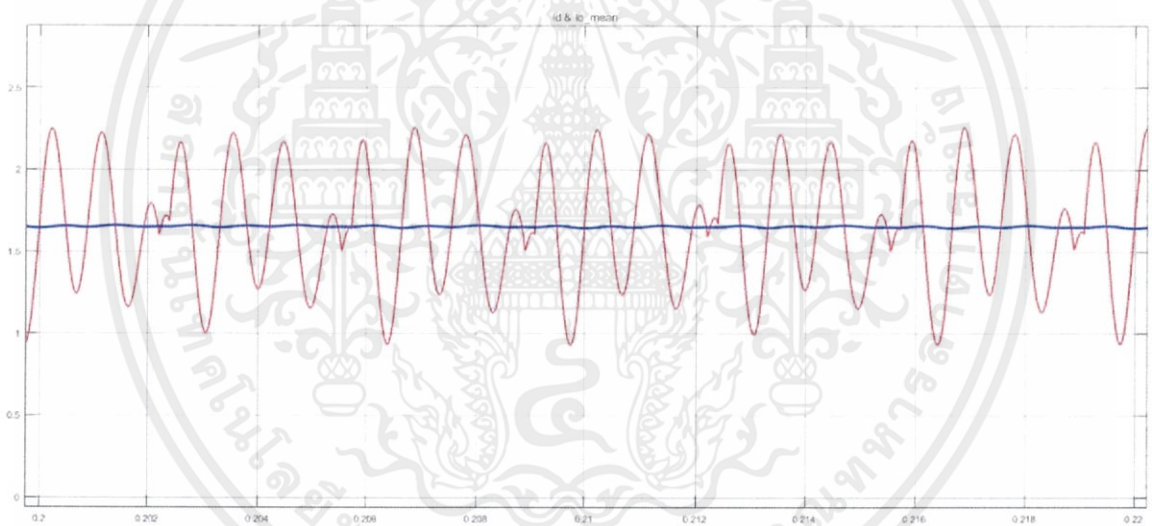


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

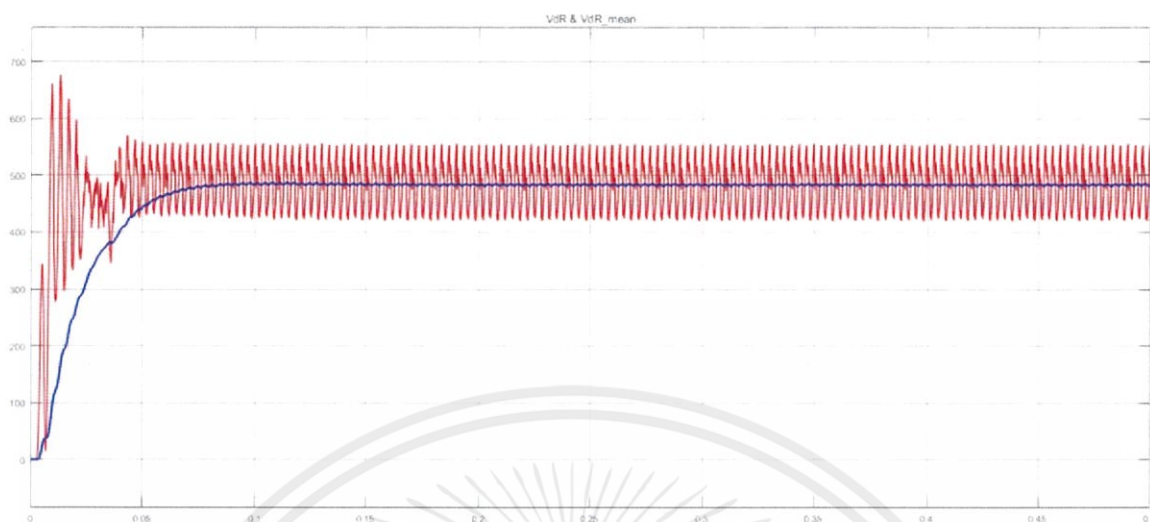


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

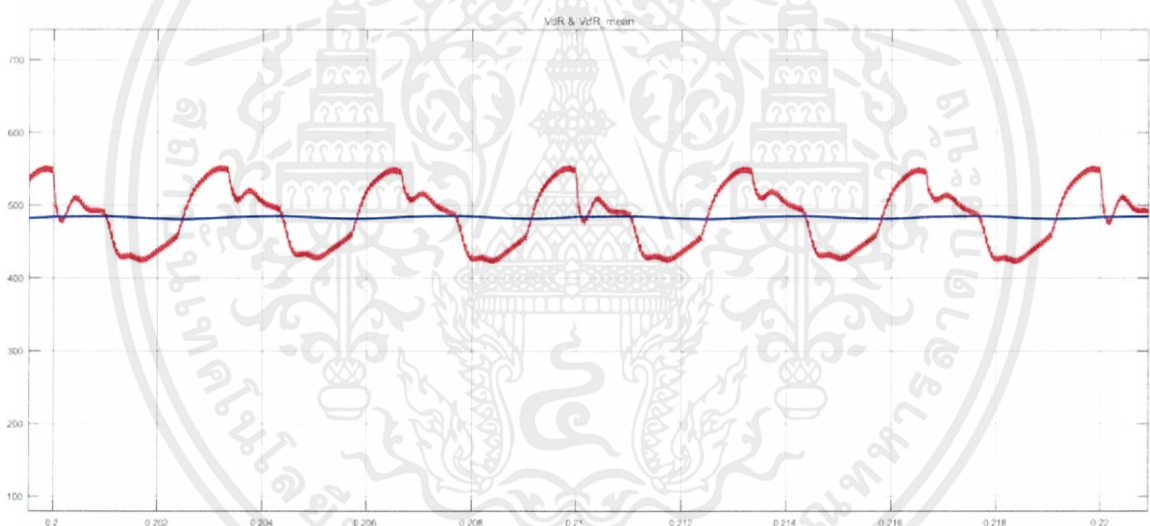


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

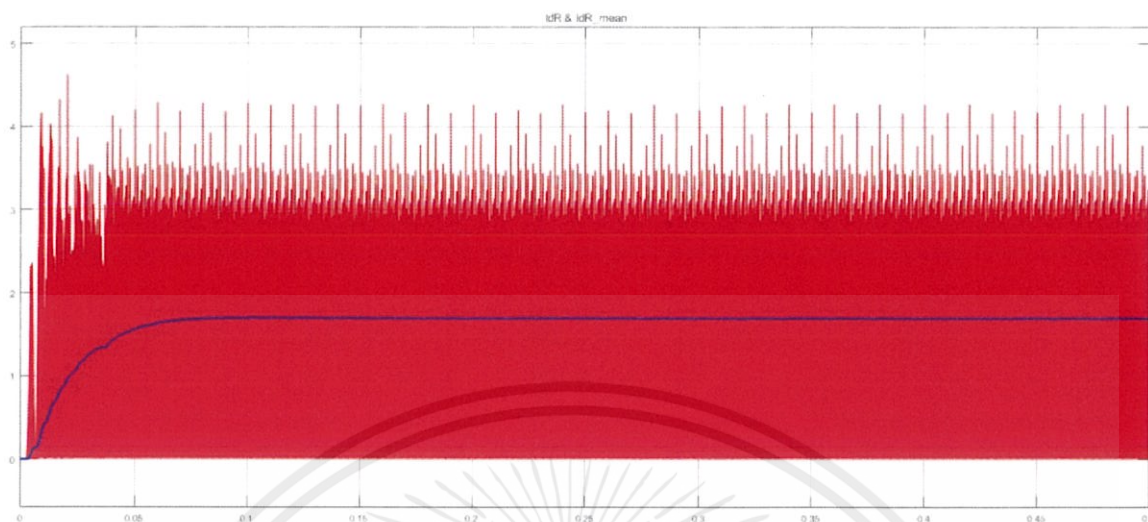


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

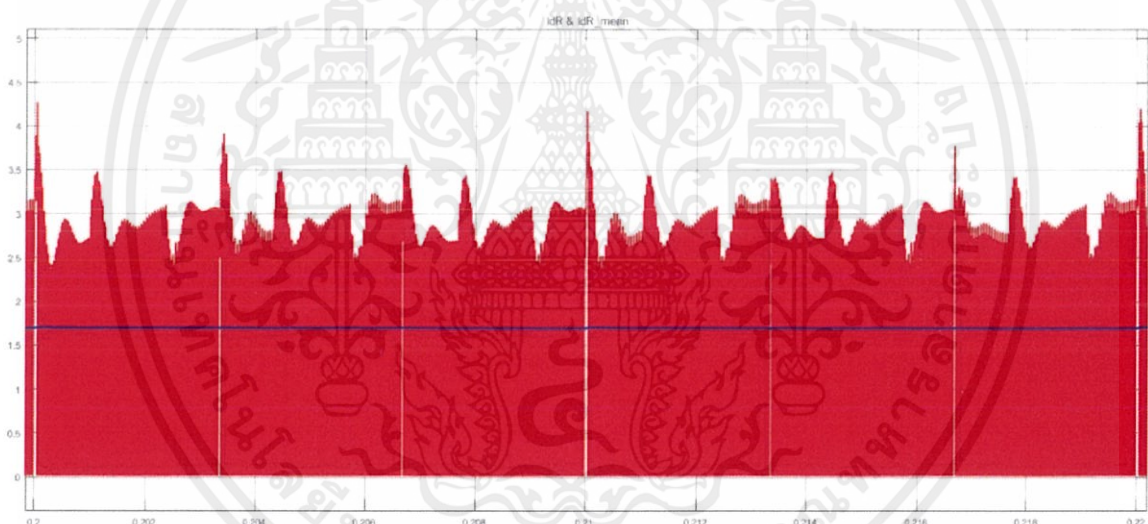


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V มีการแกว่งที่รุนแรงและมีช่วงเวลาในการแกว่งที่มากกว่าส่งผลให้รีปเปิลสูงกว่า ที่พิกัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นแรงดันมีการแกว่งมีความรุนแรงน้อยส่งผลให้รีปเปิลต่ำ แต่มีอัตราการแกว่งที่มากขึ้น และช่วงเวลาของการแกว่งลดลง เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นมีการแกว่งมากส่งผลให้รีปเปิลสูง และมีช่วงเวลาของการแกว่งน้อย

ที่พิกัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นมีความรุนแรงในการแกว่งที่ลดลงส่งผลให้ค่าริบเปิดต่ำ แต่ช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้น

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดันพิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งที่น้อยและมีความรุนแรงน้อยทำให้ค่าริบเปิดของรูปคลื่นต่ำ และเมื่อปรับพิกัดเป็น 500 V พบว่าอัตราการแกว่งมีค่าเพิ่มขึ้นและการแกว่งมีความรุนแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าริบเปิดสูงขึ้นมาก เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส ที่พิกัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นกระแสมีช่วงเวลาการแกว่งมาก ที่พิกัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นกระแสมีช่วงเวลาของการแกว่งลดลง

#### 4.3 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองด้วยชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่สร้างขึ้น ทดลองการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของสายส่ง ความยาวของสายส่งและพิกัดโหลด โดยกำหนดแรงดันที่เข้าเรกติไฟเออร์ 380 V และแรงดันที่ออกจากรีเวอร์เตอร์ 220 V

##### 1. ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง

กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง ทดลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร ผลการทดลองที่ความยาว 150 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.13 ถึง 4.15 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.23

ผลการทดลองที่ความยาว 300 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.13 ถึง 4.15 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.25

ผลการทดลองที่ความยาว 600 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.13 ถึง 4.15 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัตต์ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันไลน์ AB	V	380.2	374.5	380.6
แรงดันไลน์ BC	V	377.9	373.3	380.1
แรงดันไลน์ CA	V	384.7	379.5	386.1
กระแสเฟส A	A	1.96	2.44	2.16
กระแสเฟส B	A	2.04	2.53	2.17
กระแสเฟส C	A	1.98	2.55	2.17
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	311	315	311
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	315	318	319
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	305	326	320
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	293	270	276
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	265	263	262
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	264	257	257
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส A	VA	445	540	478
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส B	VA	442	551	474
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส C	VA	436	562	477

ตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะที่เพิ่มขึ้น แรงดันของแต่ละเฟสยังคงมีค่าประมาณ 380 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแสในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งจาก 150 กิโลเมตรเป็น 300 กิโลเมตร วัตต์ค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้จาก 1.96 A เพิ่มขึ้นเป็น 2.44 A แต่เมื่อเพิ่มระยะทางเป็น 600 กิโลเมตรค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ที่วัดได้มีค่าลดลงมาที่ 2.16 A ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากระยะ 150 กิโลเมตรเป็น 300 กิโลเมตรวัตต์ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ได้จาก 445 VA เพิ่มขึ้นเป็น 540 VA แต่เมื่อเพิ่มระยะทางเป็น 600 กิโลเมตรค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ที่วัดได้มีค่าลดลงมาที่ 478 VA

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	500.3	500.0	500.7
แรงดันขาออกสายส่ง	V	495.3	489.9	482.2
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.4	1.5	1.6
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.4	1.5	1.6
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	700.42	750.00	801.12
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	693.42	734.85	771.52

จากตารางที่ 4.14 ค่าของปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้านั้นสอดคล้องกับตารางที่ 4.10 นั่นคือแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ประมาณ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ 150 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.4 A และ 700.42 W ตามลำดับ ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.5 A และ 750 W ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.6 A และ 801.12 W ตามลำดับ และเมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าบริเวณปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า และมีค่าลดลงเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ 150 กิโลเมตรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 495.3 V ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 489.9 V และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 482.2 V ส่วนกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าขาเข้า และกำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า โดยที่ 150 กิโลเมตรวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 693.42 W ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 734.85 W และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 771.52 W

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W วัดที่โหนด

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	221.7	220.1	220.1
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	221.8	220.0	220.0
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	222.0	220.3	220.2
กระแสไลน์ A	A	1.77	1.84	1.84
กระแสไลน์ B	A	1.76	1.85	1.84
กระแสไลน์ C	A	1.76	1.84	1.85
กระแสเฟส AB	A	0.98	1.07	1.07
กระแสเฟส BC	A	0.97	1.07	1.07
กระแสเฟส CA	A	0.98	1.06	1.06
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	217.266	235.507	235.507
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	215.146	235.400	235.400
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	217.560	233.518	233.412
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0	0

ตารางที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่โหนดของแต่ละเฟสยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 220 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหนดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ 150 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.77 A และ 217.266 W ตามลำดับ ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.84 A และ 235.507 W ตามลำดับ และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.84 A และ 235.507 W ตามลำดับ

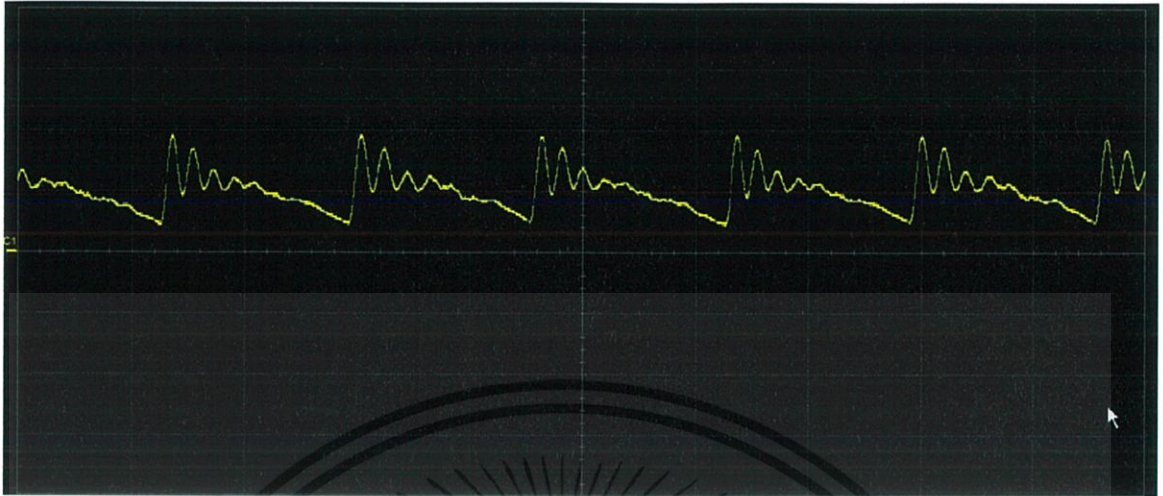
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง

ระยะสายส่ง (km)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
150	931	700.42	693.42	649.97
300	959	750.00	734.85	704.42
600	950	801.12	771.52	704.32

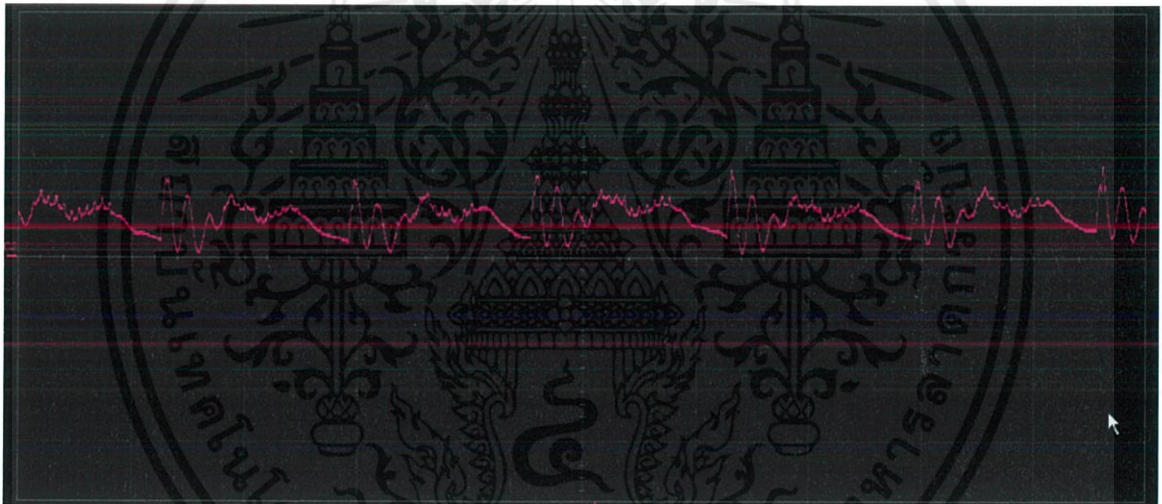
จากตารางที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) มีค่าลดลงเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 230.58 209.00 และ 148.88 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.00 15.15 และ 29.6 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.45 30.42 และ 67.20 W ตามลำดับ

เมื่อเทียบแนวโน้มของผลการจำลองจากตารางที่ 4.2 กับผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งทั้งตาราง แต่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงทั้งขาเข้าและขาออกของทั้งตารางกลับมีแนวโน้มตรงกันข้ามกัน นั่นคือแนวโน้มของผลการจำลองจากตารางที่ 4.2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงลดลงเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.14 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ซึ่งจากการเปรียบเทียบดังกล่าวแล้วเกิดความแตกต่างขึ้น สาเหตุอาจเกิดจากการสร้างชุดทดลองขึ้นมาตรงส่วนของการจำลองสายส่งนั้น มีค่าความต้านทานแฝงอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแต่ละค่าอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมและแก้ไขไม่ได้ ทำให้ค่าความต้านทานในสายส่งที่ระยะต่าง ๆ เกินค่าที่คำนวณออกแบบไว้ในตอนแรก ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนในการทดลอง จึงอาจต้องมีการปรับปรุงชุดทดลองนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในภายภาคหน้า

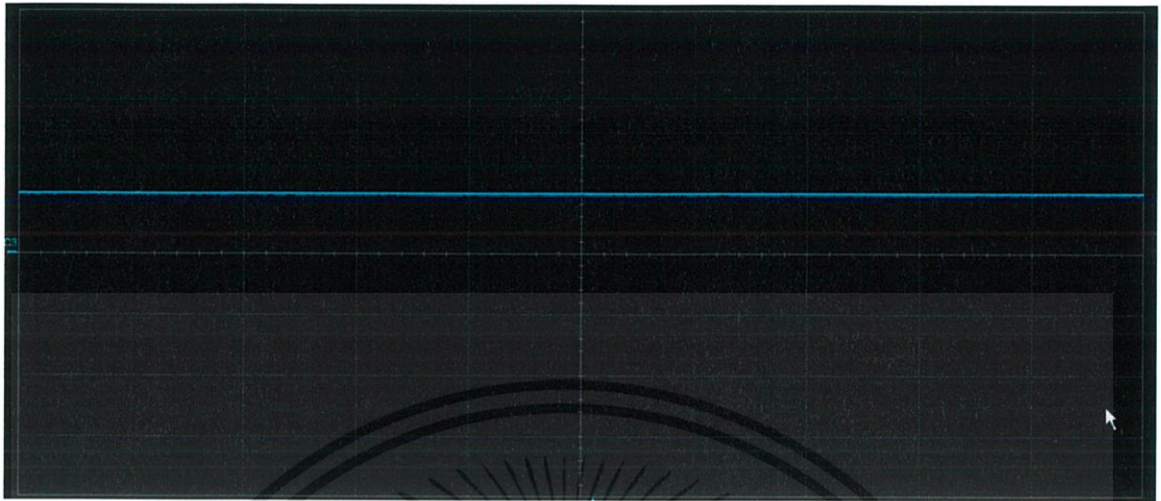


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

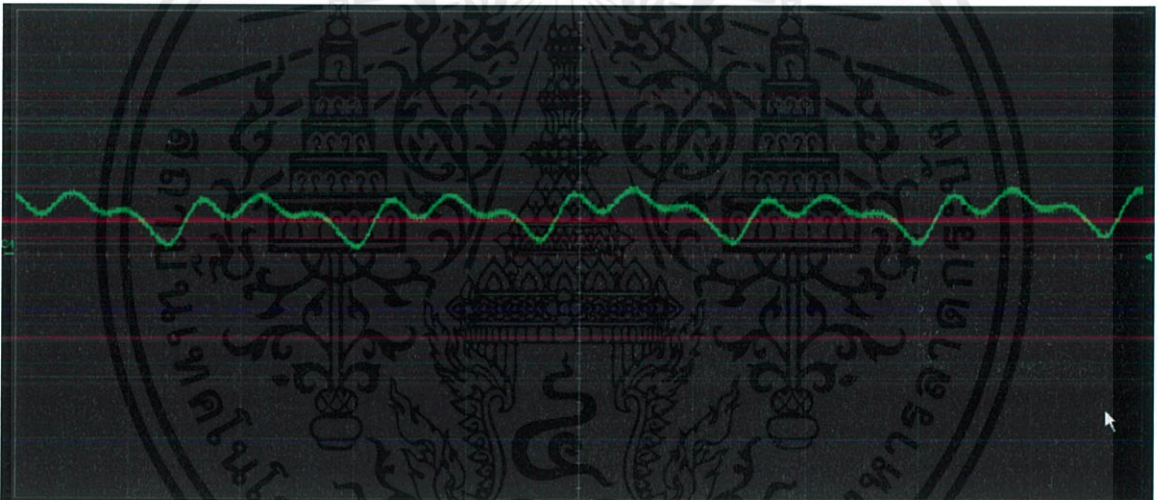


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.22 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร

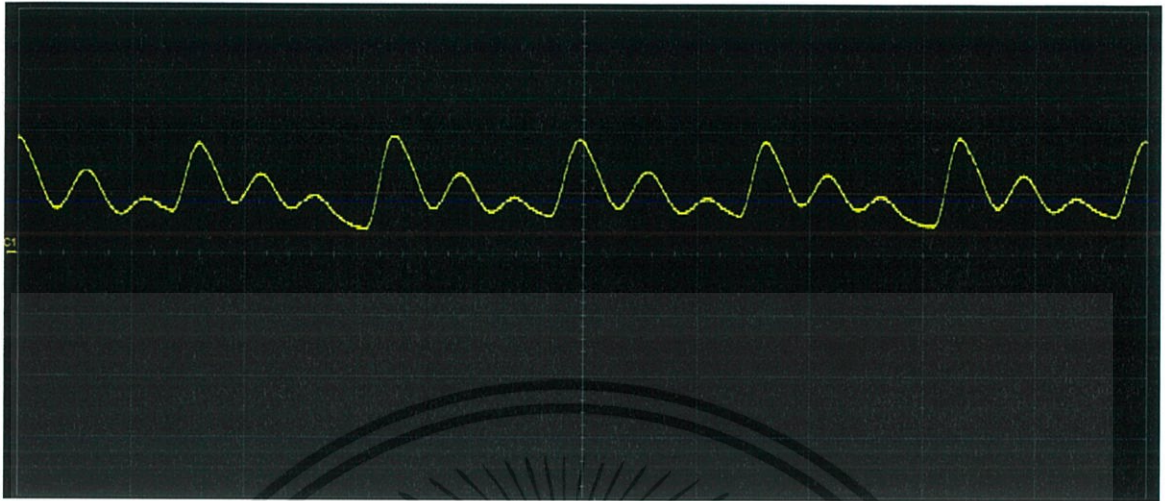


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง

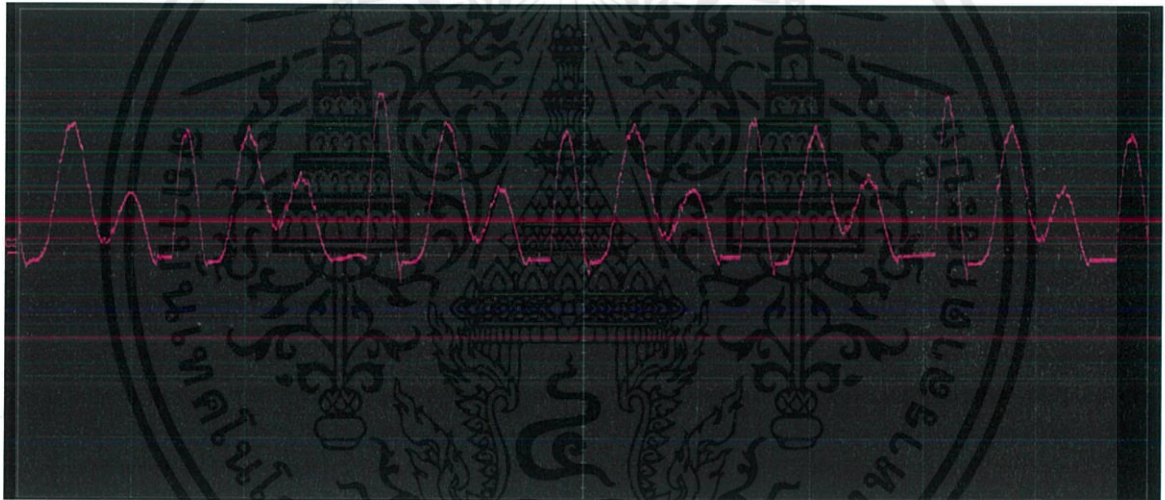


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร



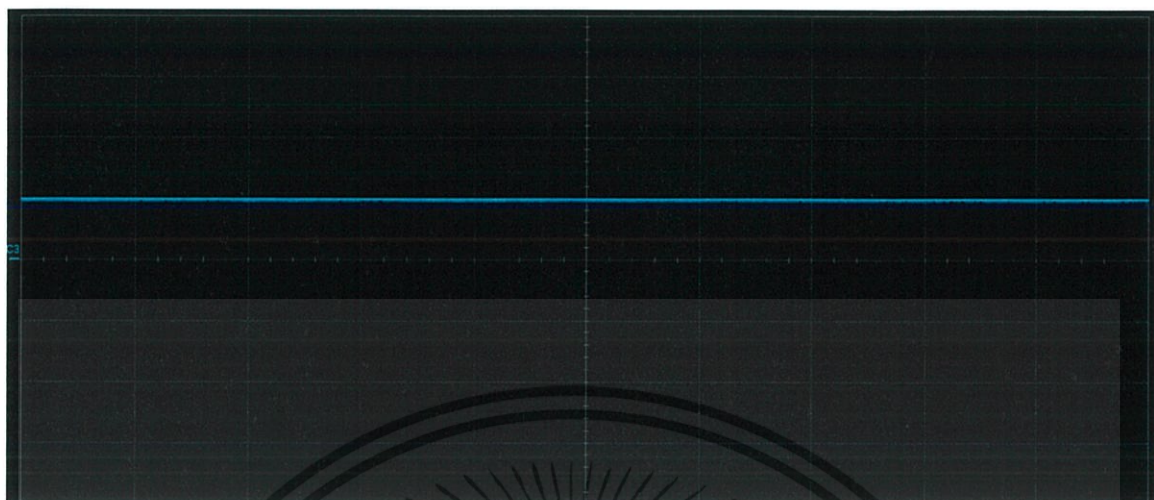
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



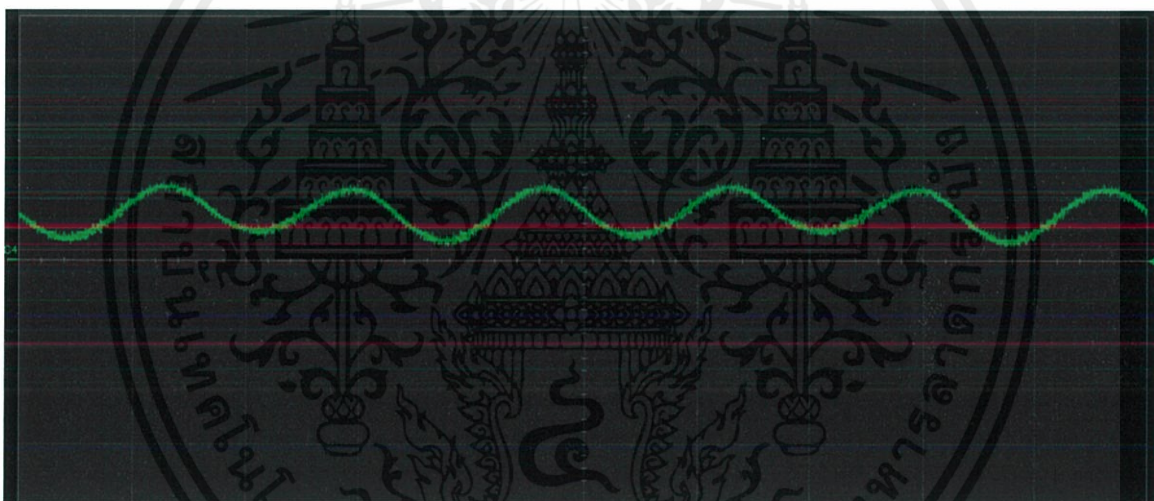
(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.24 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

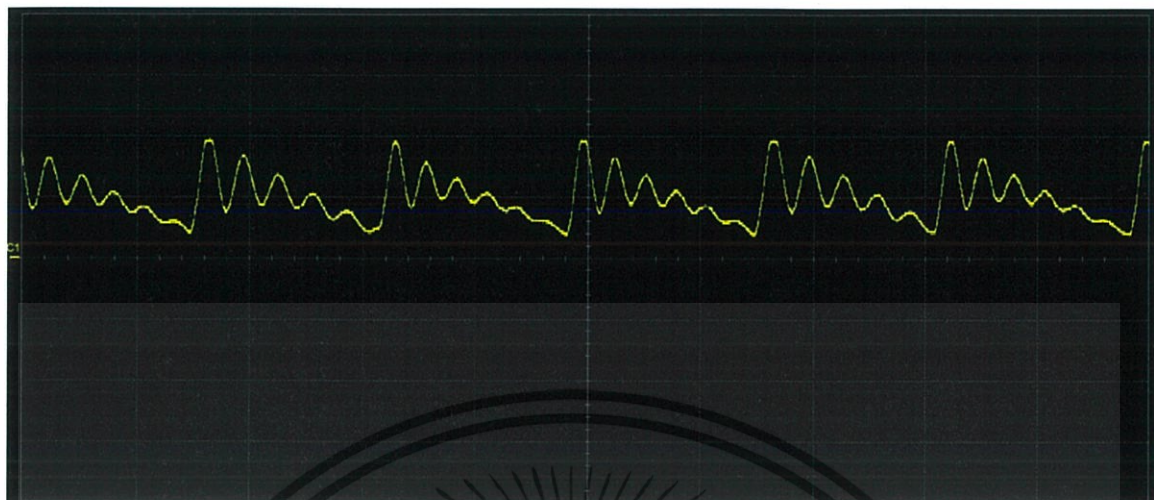


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง

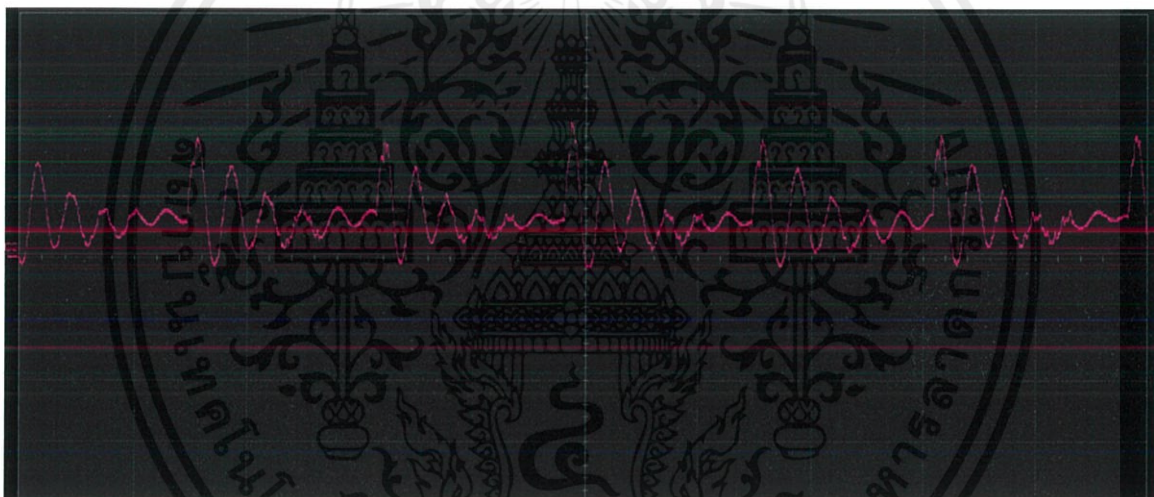


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

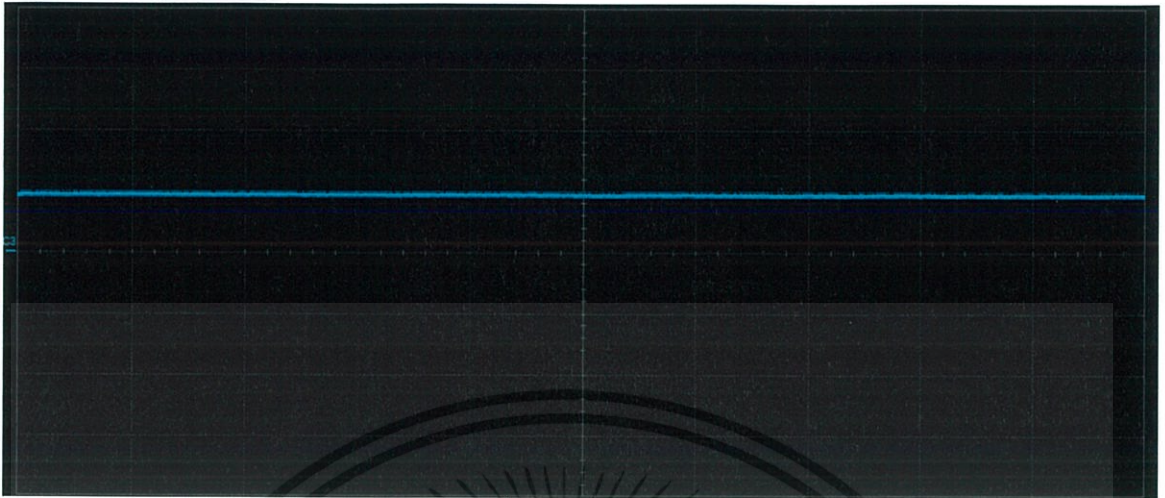


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

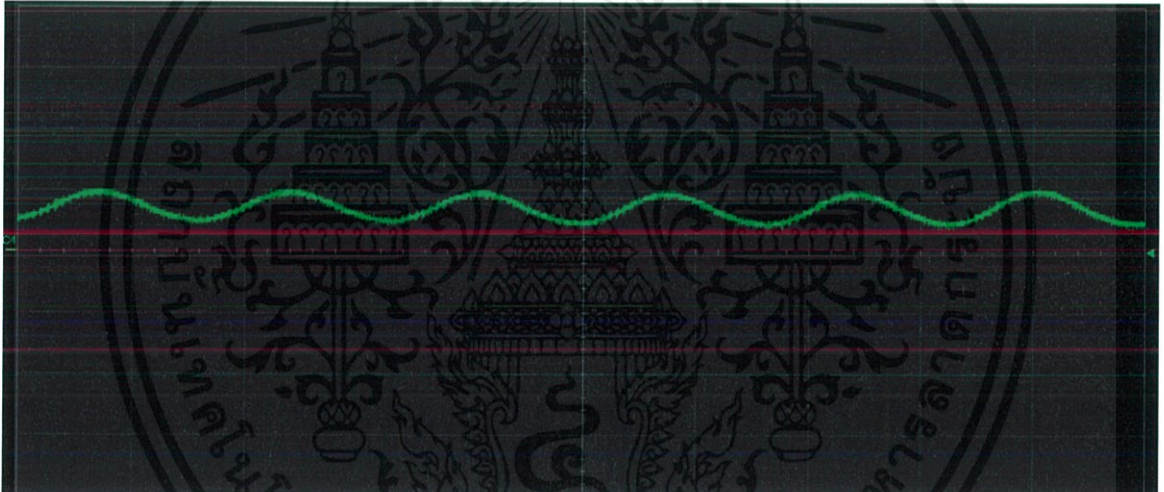


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.27 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร

จากรูปคลื่นกระแสและแรงดันขาเข้าสายส่งของแต่ละความยาวพบว่า รูปคลื่นแรงดันขาเข้าที่ความยาวสายส่ง 150 กิโลเมตร มีการแกว่งจำนวนครั้งและความรุนแรงน้อยที่สุดและหายไปเร็วที่สุด เมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่งเป็น 300 กิโลเมตร การแกว่งมีความรุนแรงมากขึ้นและหายไปช้าที่สุด และเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่งเป็น 600 กิโลเมตร พบว่าการแกว่งมีความรุนแรงน้อยกว่าระยะ 300 กิโลเมตร แต่รุนแรงกว่าและหายไปช้ากว่าที่ระยะ 150 กิโลเมตร เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส พบว่ามีแนวโน้มการแกว่งเช่นเดียวกับรูปคลื่นแรงดันขาเข้าสายส่ง แต่มีริบเปิลสูงขึ้นเมื่อปรับระยะสายส่งมากขึ้น

จากรูปคลื่นกระแสและแรงดันหลังขาออกสายส่งของแต่ละความยาวพบว่า รูปคลื่นแรงดันออกจากสายส่งของระยะ 150 300 และ 600 กิโลเมตร มีความเรียบเหมือนกัน และเมื่อพิจารณา

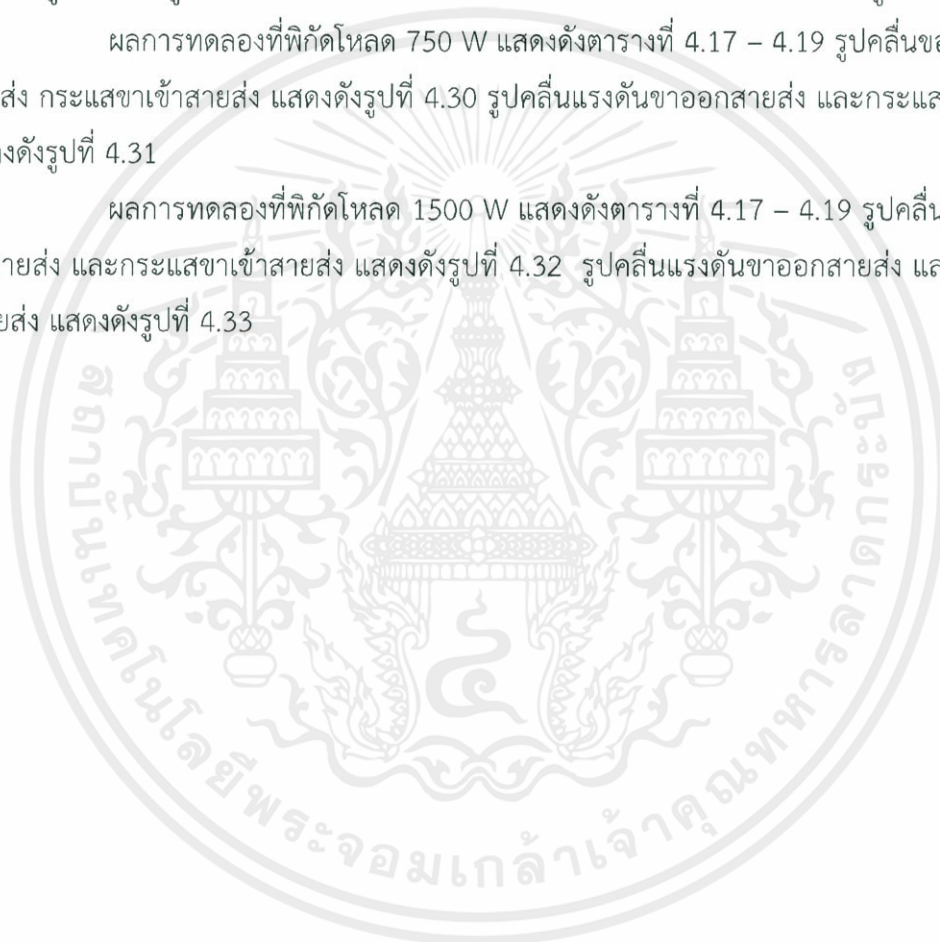
รูปคลื่นกระแสออกจากสายส่ง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะสายส่งรูปคลื่นกระแสมีความเรียบมากขึ้นเนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำในสายส่งที่เพิ่มขึ้น

## 2. ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด ทดลองที่พิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W ผลการทดลองที่พิกัดโหลด 300 W แสดงดังตารางที่ 4.17 – 4.19 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.29

ผลการทดลองที่พิกัดโหลด 750 W แสดงดังตารางที่ 4.17 – 4.19 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง กระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.31

ผลการทดลองที่พิกัดโหลด 1500 W แสดงดังตารางที่ 4.17 – 4.19 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.32 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.33



ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)		
		300	750	1500
แรงดันไลน์ AB	V	380.7	379.7	380.5
แรงดันไลน์ BC	V	378.4	376.8	387.0
แรงดันไลน์ CA	V	384.5	383.4	383.9
กระแสเฟส A	A	1.31	2.15	3.91
กระแสเฟส B	A	1.33	2.17	3.89
กระแสเฟส C	A	1.31	2.15	3.84
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	163	311	603
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	171	314	605
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	170	318	605
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	134	283	556
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	128	270	529
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	118	262	523

ตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แรงดันของแต่ละเฟสยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 380 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแสในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดของโหลดในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากโหลดพิกัด 300 W เป็นโหลดที่พิกัด 750 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้จาก 1.31 A เพิ่มขึ้นเป็น 2.15 A และเมื่อเพิ่มพิกัดโหลดเป็น 1500 W ค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ที่วัดได้มีค่าเป็น 3.91 A ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือเมื่อพิกัดโหลดในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากพิกัด 300 W เป็น 750 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ได้จาก 291 VA เพิ่มขึ้นเป็น 486 VA และเมื่อเพิ่มพิกัดโหลดเป็น 1500 W ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ที่วัดได้มีค่าเป็น 867 VA

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)		
		300	750	1500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	495.5	498.2	501.1
แรงดันขาออกสายส่ง	V	487.2	479.5	462.7
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	0.5	1.4	3.1
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	0.5	1.4	3.1
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	247.75	697.48	1553.41
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	243.60	671.30	1434.37

ตารางที่ 4.18 ค่าของปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้านั้นสอดคล้องกับตารางที่ 4.13 นั่นคือแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ประมาณ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นพิกัดของโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่โหลดพิกัด 300 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 0.5 A และ 247.75 W ตามลำดับ ต่อมาที่โหลดพิกัด 750 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.4 A และ 697.48 W ตามลำดับ และที่โหลดพิกัด 1500 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 3.1 A และ 1553.41 W ตามลำดับ และเมื่อมาวัดปริมาณไฟฟ้าบริเวณปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า และมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อพิกัดของโหลดเพิ่มมากขึ้น โดยที่โหลดพิกัด 300 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 487.2 V ต่อมาที่โหลดพิกัด 750 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 479.5 V และโหลดพิกัด 1500 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 462.7 V ส่วนกระแสไฟฟ้าออกมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าขาเข้า และกำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า โดยที่โหลดพิกัด 300 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 243.6 W ต่อมาที่โหลดพิกัด 750 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 671.3 W และที่โหลดพิกัด 1500 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1434.37 W

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหนด

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหนด (W)		
		300	750	1500
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	227.6	218.7	223.2
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	227.1	218.7	223.4
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	227.1	218.8	223.1
กระแสไลน์ A	A	0.66	1.75	3.62
กระแสไลน์ B	A	0.66	1.74	3.62
กระแสไลน์ C	A	0.66	1.75	3.62
กระแสเฟส AB	A	0.34	0.97	2.04
กระแสเฟส BC	A	0.34	0.97	2.04
กระแสเฟส CA	A	0.35	0.97	2.05
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	77.384	212.139	455.328
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	77.214	212.139	455.736
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	79.485	212.236	457.355
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0	0

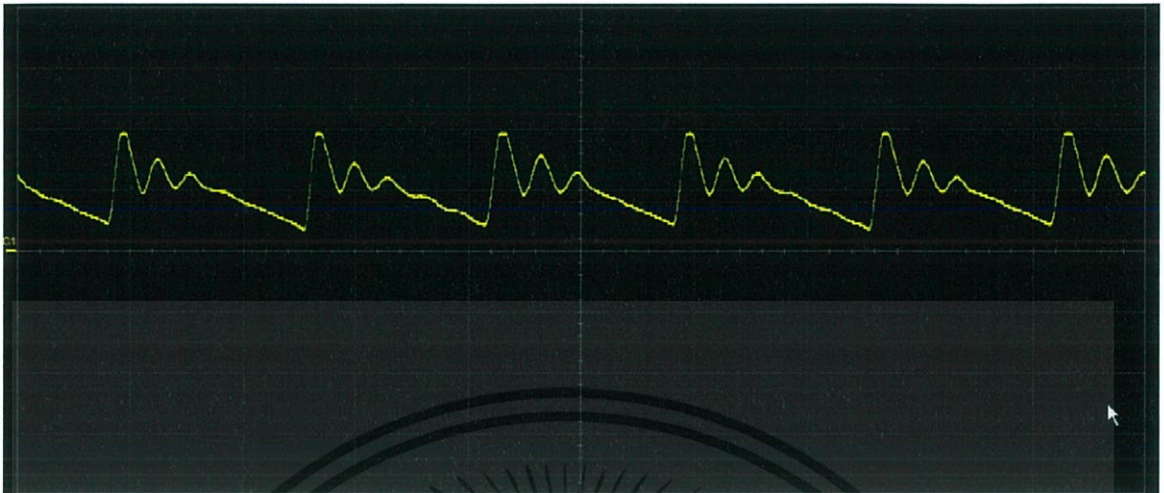
ตารางที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่โหนดของแต่ละเฟสยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 220 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหนดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหนดในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่โหนดพิกัด 300 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 0.66 A และ 77.384 W ตามลำดับ ต่อมาที่โหนดพิกัด 750 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.75 A และ 212.139 W ตามลำดับ และโหนดพิกัด 1500 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 3.62 A และ 455.328 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

พิกัดโหลด (W)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
300	504	247.75	243.60	234.083
750	943	697.48	671.30	636.51
1500	1813	1553.41	1434.37	1368.42

จากตารางที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 256.25 — 245.52 และ 259.59 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.15 26.18 และ 119.04 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.52 34.79 และ 65.95 W ตามลำดับ จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลดเกิดขึ้นกับสายส่ง

เมื่อเทียบแนวโน้มของผลการจำลองจากตารางที่ 4.6 กับผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งทั้งตาราง แต่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงทั้งขาเข้าและขาออกของทั้งสองตารางมีค่าไม่เหมือนกัน เนื่องจากการทดลองกระแสขาเข้าและขาออกนั้นมีค่าเท่ากัน ส่วนจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมกระแสขาออกจะมากกว่าขาเข้าเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์แฝงของระบบและผลของตัวเก็บประจุ ส่วนกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้นแตกต่างกันเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุในระบบจำลองที่ทำให้กระแสมีค่าสูงขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าในสายส่งสูงขึ้น แต่พารามิเตอร์แฝงของระบบจำลองนั้นมีผลน้อยทำให้ที่โหลด 300 W จากตารางที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสายส่งมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ออกสายส่ง แต่ในส่วนของตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์แฝงมีผลค่อนข้างมากทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ในสายส่งมีน้อยกว่า 300 W ส่วนในกรณีโหลดพิกัด 750 W และ 1500 W ของระบบจำลอง กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าเนื่องจากผลของกระแสที่มีค่ามากขึ้นค่อนข้างมากส่งผลทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียมากขึ้น

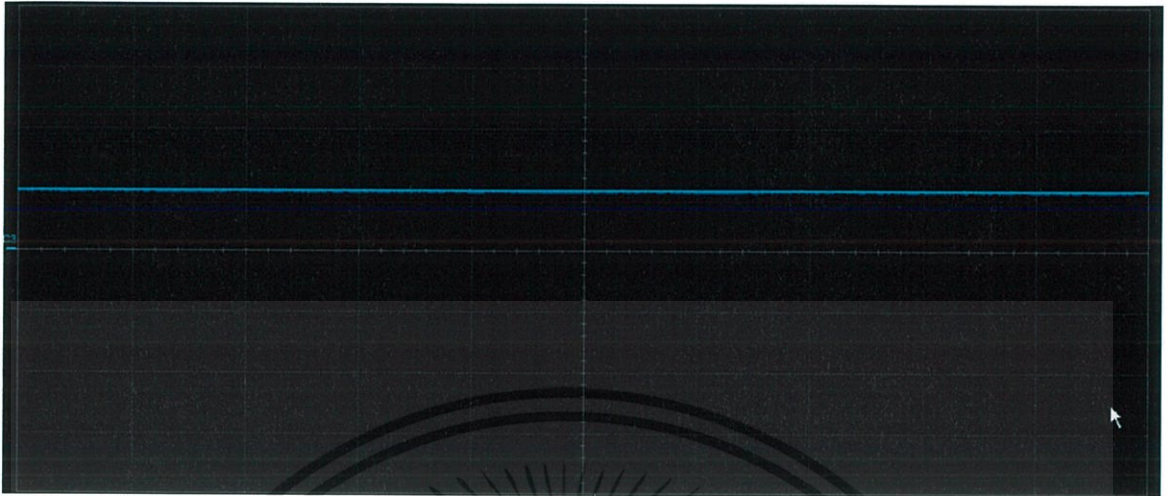


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

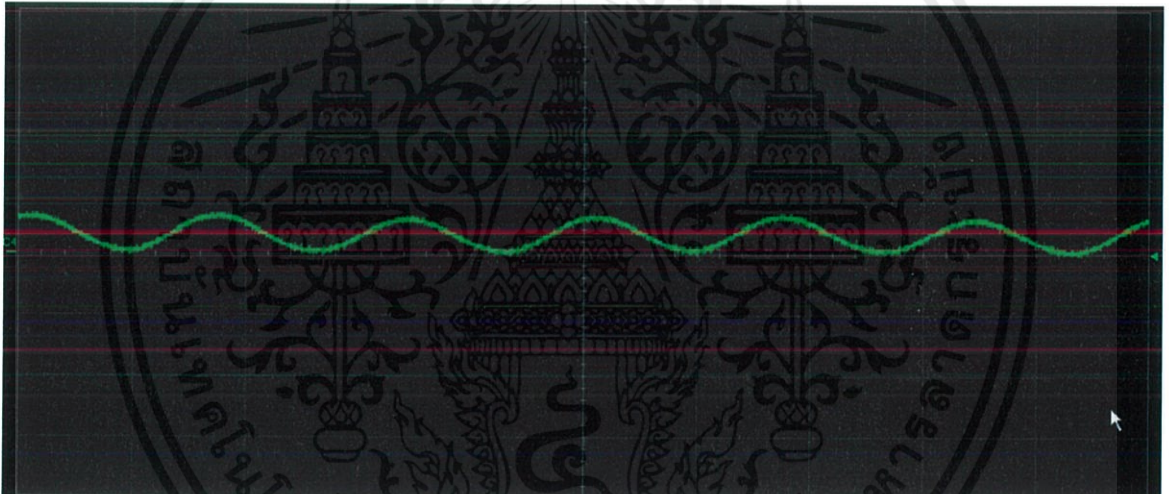


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.28 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W

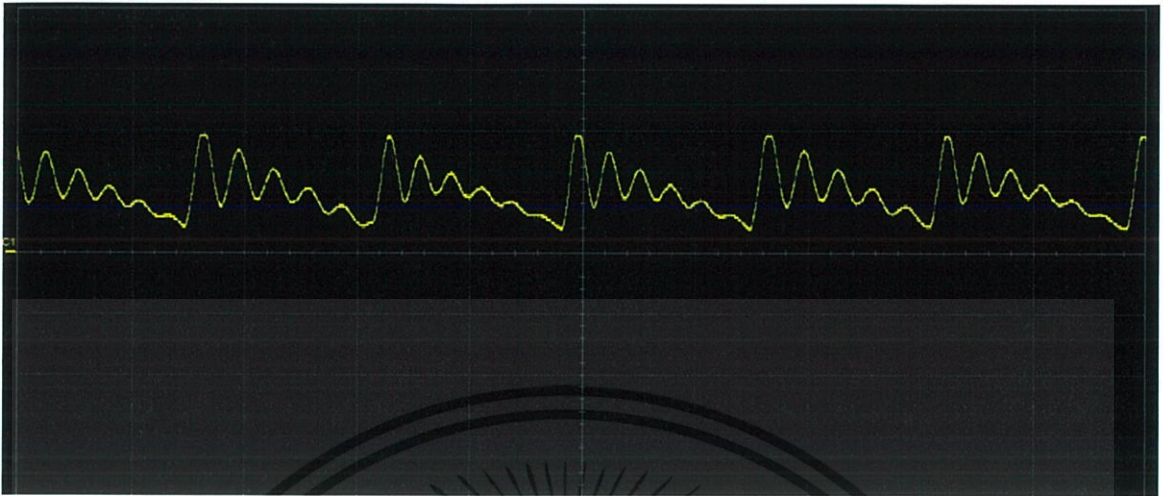


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W



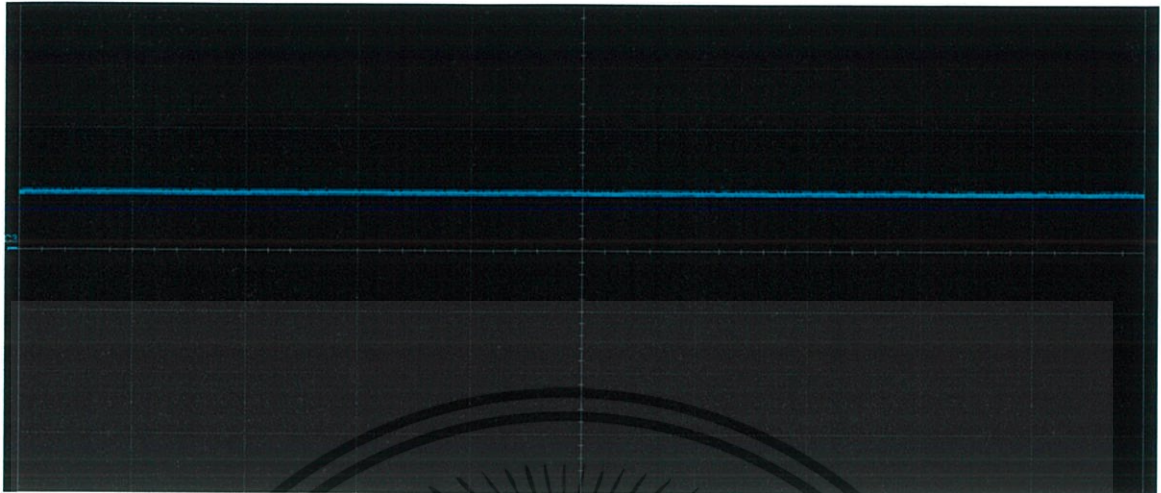
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



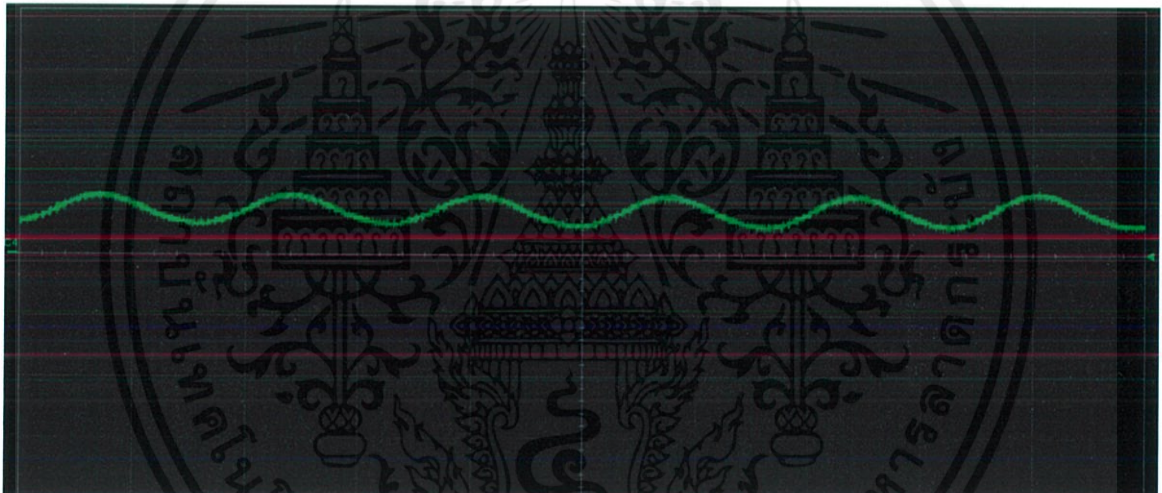
(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.30 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

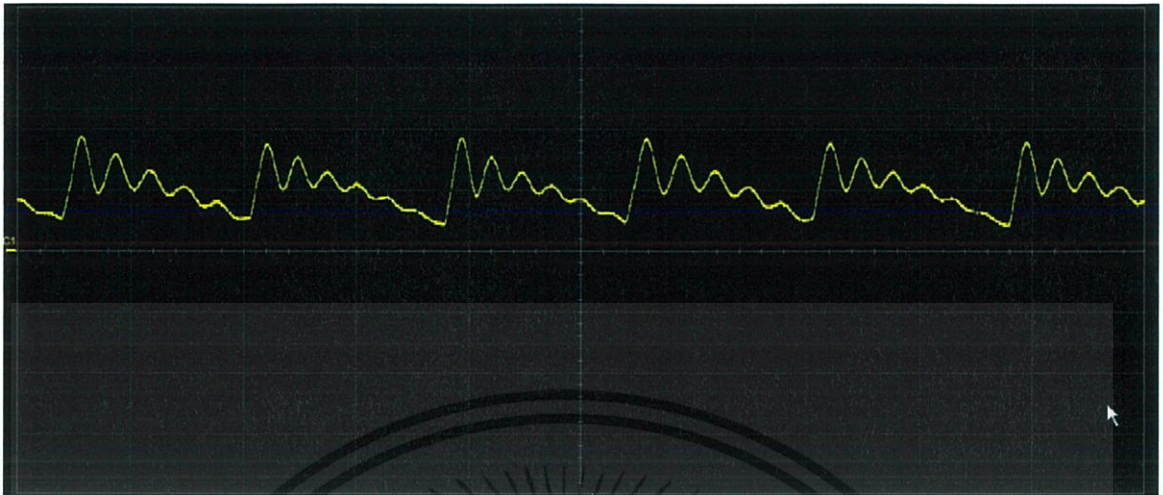


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.31 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

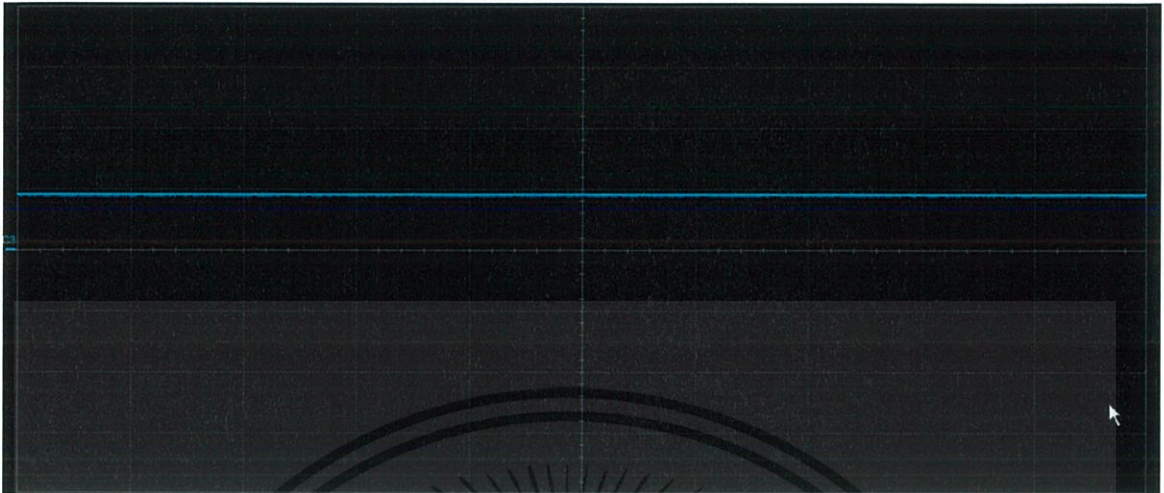


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

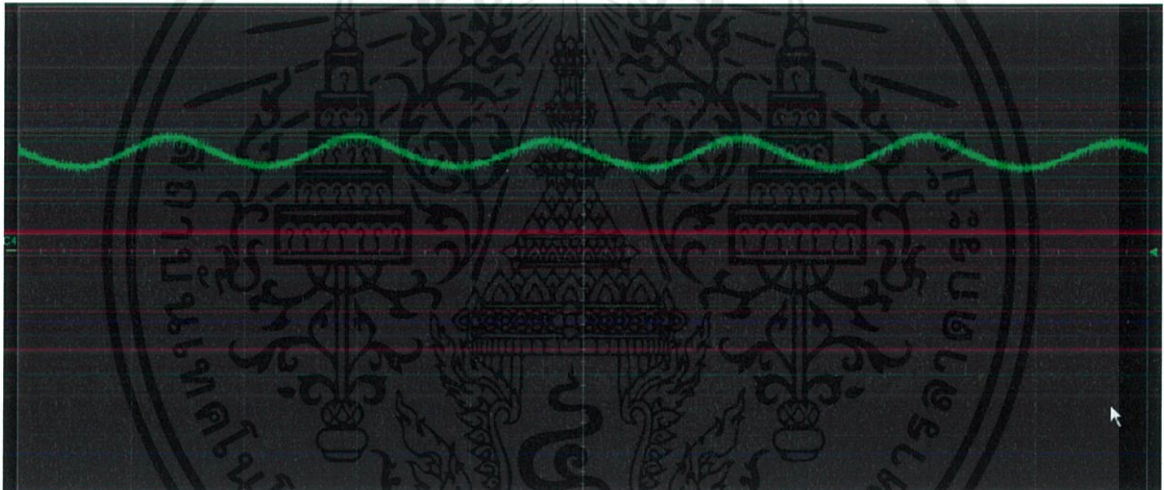


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.32 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.33 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

จากรูปคลื่นของกระแสและแรงดันขาเข้าสายส่งของแต่ละพิกัดโหนดพบว่า ทั้งรูปคลื่นแรงดันและกระแสก่อนเข้าสายส่งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกันคือ เมื่อพิกัดโหนดเป็น 300 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีรีปเปิลมากที่สุดแต่มีช่วงเวลากว้างน้อยที่สุด เมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหนดเป็น 750 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีรีปเปิลที่ลดลงแต่ช่วงเวลากว้างเพิ่มขึ้น และเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหนดเป็น 1500 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสจะมีรีปเปิลที่น้อยที่สุด

จากรูปคลื่นของกระแสและแรงดันขาออกสายส่งของแต่ละพิกัดโหนดพบว่า แรงดันขาออกสายส่งมีความเรียบเหมือนกันทั้งสามพิกัดโหนด แต่เมื่อเพิ่มโหนดพบว่า ค่ารีปเปิลของรูปคลื่นกระแสทั้งสามพิกัดโหนดไม่มีความแตกต่างกัน

### 3. ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน ทดลองที่พิกัดแรงดัน 450 และ 500 V ผลการทดลองที่พิกัดแรงดัน 450 V แสดงดังตารางที่ 4.21-4.23 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.34 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.35

ผลการทดลองที่พิกัดแรงดัน 500 V แสดงดังตารางที่ 4.21-4.23 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.36 รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง และกระแสขาออกสายส่ง แสดงดังรูปที่ 4.37

**ตารางที่ 4.21** ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันไลน์ AB	V	379.5	379.7
แรงดันไลน์ BC	V	377.1	376.8
แรงดันไลน์ CA	V	383.4	383.4
กระแสเฟส A	A	2.35	2.15
กระแสเฟส B	A	2.36	2.17
กระแสเฟส C	A	2.35	2.15
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	316	311
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	323	314
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	325	318
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	329	283
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	315	270
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	305	262
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส A	VA	519	486
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส B	VA	515	480
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส C	VA	515	483

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดันขาเข้าสายส่งที่เพิ่มขึ้น แรงดันไลน์ยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 380 V ทั้ง 3 เส้น ส่วนกระแสในแต่ละเฟสมีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้นจาก 450 V เป็น 500 V โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้ จาก 2.35 A ลดลงเป็น 2.15 A ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้นจาก 450 V เป็น 500 V วัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ได้จาก 519 VA ลดลงเป็น 486 VA

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	450.0	498.2
แรงดันขาออกสายส่ง	V	429.9	479.5
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.6	1.4
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.6	1.4
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	720.00	697.48
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	687.84	671.30

ปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้านั้นสอดคล้องกับตารางที่ 4.21 นั่นคือแรงดันขาเข้าสายส่งมีปริมาณคงเดิมที่ประมาณ 450 V และ 498.2 V กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.6 A และ 720 W ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.4 A และ 697.48 W ตามลำดับ เมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าด้านขาออกสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ด้านขาเข้า และแรงดันตกคร่อมสายส่งมีค่าน้อยลงเมื่อแรงดันด้านขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยแรงดัน 450 V วัดค่าแรงดันขาออกได้เท่ากับ 429.9 V และที่แรงดัน 500 V วัดค่าแรงดันขาออกได้เท่ากับ 479.5 V ส่วนกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 687.84 W และที่แรงดัน 500 V วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 671.3 W

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหนด

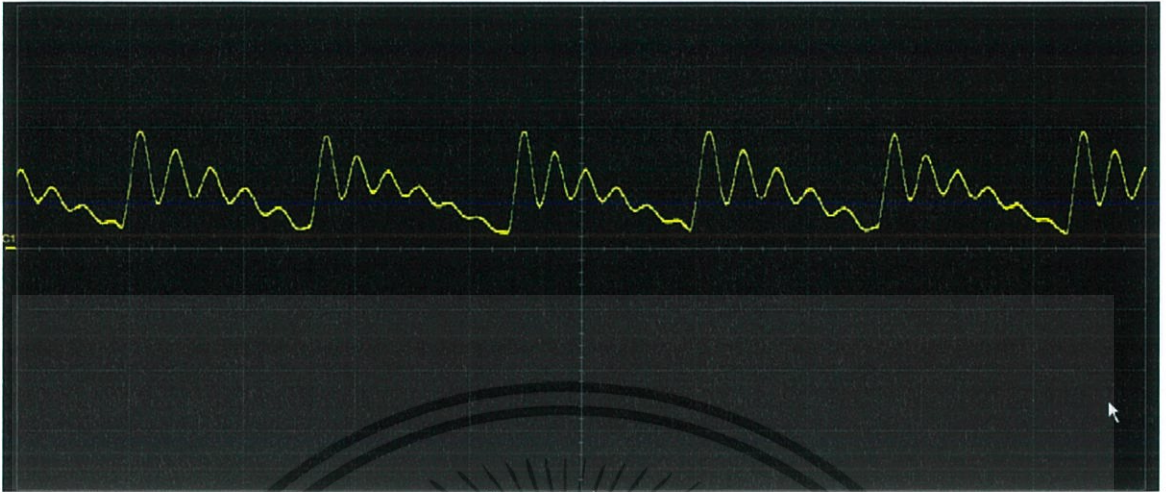
ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	221.8	218.7
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	221.6	218.7
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	221.8	218.8
กระแสไลน์ A	A	1.76	1.75
กระแสไลน์ B	A	1.75	1.74
กระแสไลน์ C	A	1.76	1.75
กระแสเฟส AB	A	0.97	0.97
กระแสเฟส BC	A	0.97	0.97
กระแสเฟส CA	A	0.98	0.97
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	215.146	212.139
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	214.952	212.139
กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	217.364	212.236
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0
กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0

ตารางที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่โหนดของแต่ละเฟสยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 220 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแส และกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหนดมีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.76 A และ 215.146 W ตามลำดับ และแรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.75 A และ 212.139 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน

พิกัดแรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D
450	964.00	720.00	687.84	647.46
500	943.00	697.48	671.30	636.51

จากตารางที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตำแหน่ง A และ B) มีค่าเกือบคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 244 และ 245.52 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตำแหน่ง B และ C) มีค่าลดลงเมื่อพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 32.16 และ 26.18 W ตามลำดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างตำแหน่ง C และ D) มีเกือบลดลงเล็กน้อย 40.378 และ 34.786 W ตามลำดับ จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันเกิดขึ้นกับสายส่ง

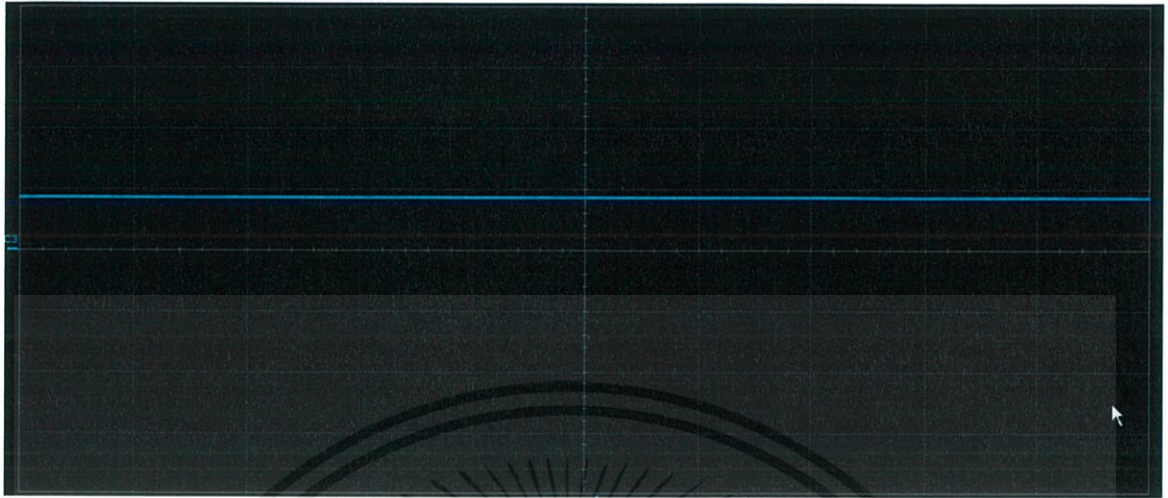


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

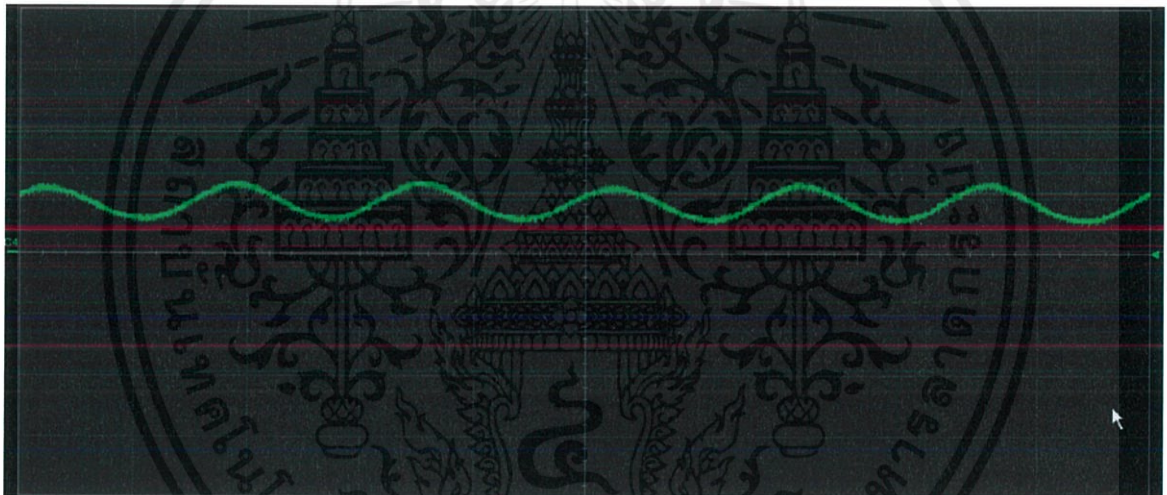


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.34 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

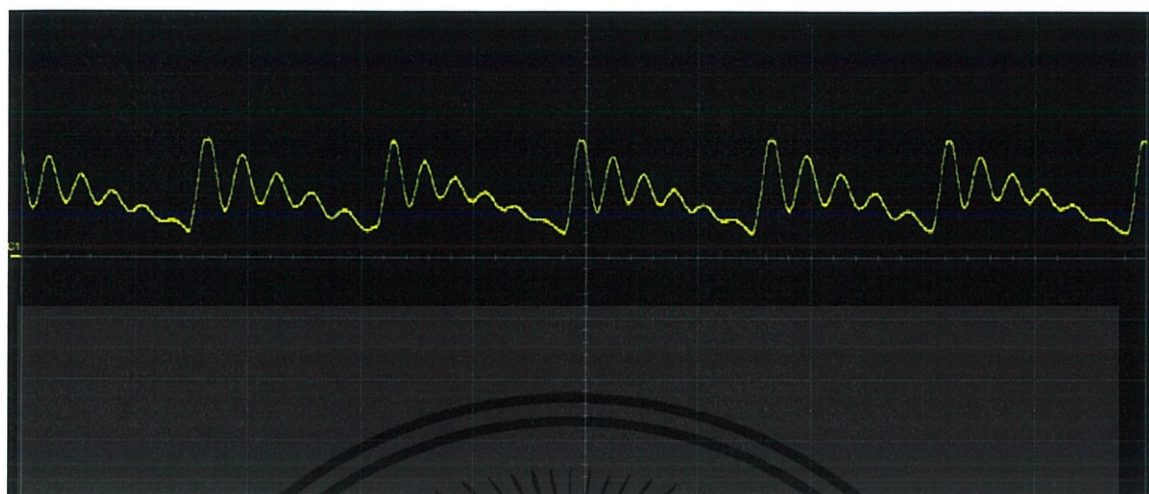


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง

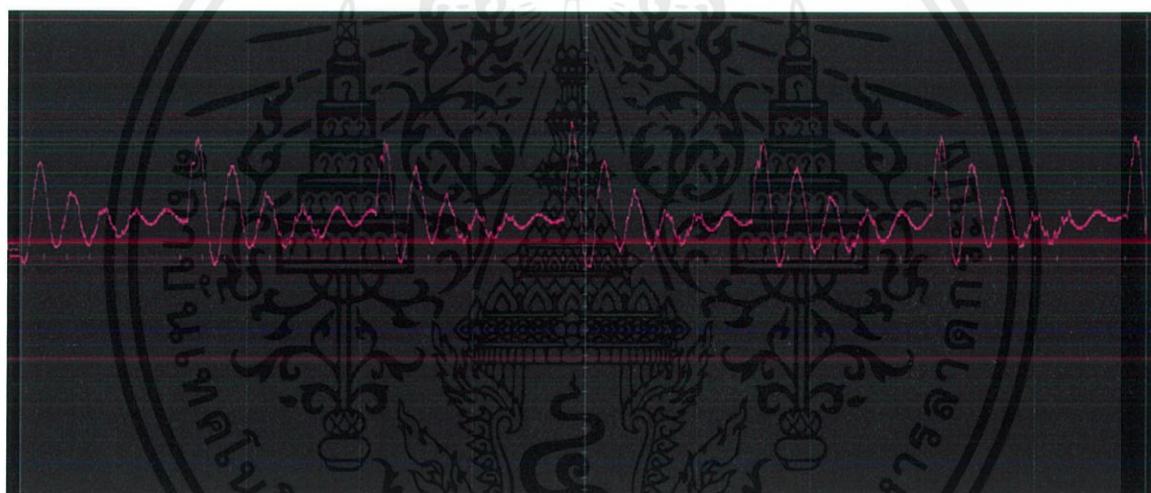


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.35 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

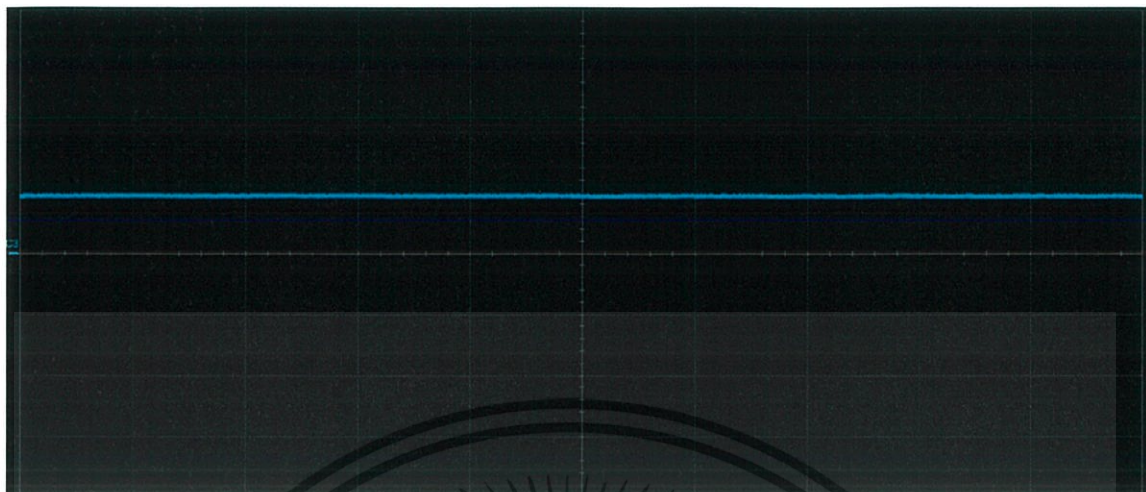


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาเข้าสายส่ง

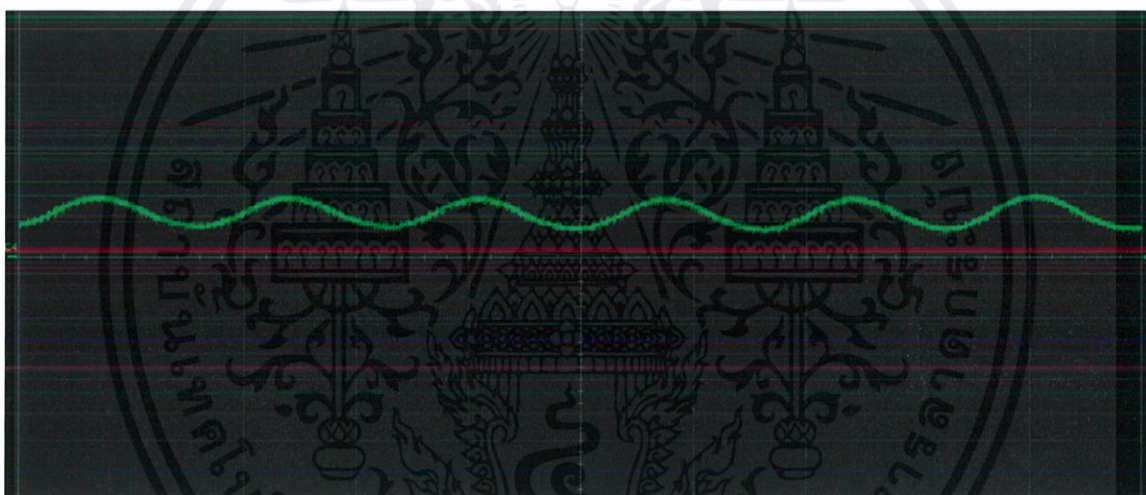


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.36 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.37 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งของแต่ละพิกัดแรงดันพบว่า เมื่อเพิ่มพิกัดแรงดันส่งผลให้ค่ารีปเปิลของรูปคลื่นแรงดันนั้นมีค่าลดลง แต่ช่วงเวลาการแกว่งของรูปคลื่นนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณากระแสขาเข้าสายส่งพบว่ารีปเปิลและช่วงเวลาการแกว่งของรูปคลื่นไม่มีความแตกต่างกัน

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งของแต่ละพิกัดแรงดันพบว่า รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งมีความเรียบไม่แตกต่างกัน แต่รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งของแรงดันพิกัด 500 V มีค่ารีปเปิลน้อยกว่าแรงดันพิกัด 450 V เล็กน้อย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยจำลองระบบของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้ากुरुณ (Gurun) ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (Tenaga Nasional Berhad : TNB) และสถานีไฟฟ้าคลองแจะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Overhead) ที่ระดับแรงดัน 300 kV อีกทั้งในอนาคตจะมีโครงการระบบไฟฟ้ากับประเทศจีน Jinhong-Thailand โดยคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จะมีเพิ่มมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีข้อได้เปรียบระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงหลายด้าน ที่เห็นได้ชัดคือความคุ้มค่าเมื่อทำการสร้างสายส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีระยะไกล ผู้จัดทำจึงทำการสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงว่ามีพฤติกรรมอย่างไร เพื่อให้ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าในอนาคตมีประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และความมั่นคงทางพลังงานที่มากขึ้น

เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โครงการนี้จึงได้ออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของสายส่ง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบส่ง โดยทำการทดลองผ่านชุดทดลองและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า จากกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

#### 1. การจำลองระบบสายส่งเมื่อทำการเปลี่ยนความยาวสายส่ง

โดยทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จำลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะพบว่าความยาวสายส่งที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าแต่ละชนิดต่างกัน โดยในสายส่งที่ความยาว 150 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 1.181 % และ 0.82 % ตามลำดับ ในสายส่งความยาว 300 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 0.501 % และ 1.6 % ตามลำดับ และที่ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 1.262 % และ 3.14 % ตามลำดับ

## 2. การจำลองระบบสายส่งเมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จำลองที่พิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดของโหลดที่เปลี่ยนนั้นมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของระบบ ไม่ว่าจะเป็น ค่าที่วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์ ค่าที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง และค่าที่วัดที่โหลด โดยเมื่อต่อโหลดที่พิกัด 300 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น -3.185 % และ 1.42 % ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดที่มีพิกัด 750 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 1.262 % และ 3.14 % ตามลำดับ และเมื่อต่อโหลดที่มีพิกัด 1500 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 5.363 % และ 5.88 % ตามลำดับ

## 3. การจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน จำลองที่พิกัดแรงดัน 450 V และ 500 V จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแรงดันในสายส่ง จะทำให้ปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆเปลี่ยนไป โดยเมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 450 V จะทำให้มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 3.516 % และ 2.978 % ตามลำดับ เมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 500 V จะทำให้มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น -1.181 % และ 0.82 % ตามลำดับ

## 4. การจำลองระบบสายส่งจากชุดทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวสายส่ง

โดยทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จำลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะพบว่าความยาวสายส่งที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าแต่ละชนิดต่างกัน โดยในสายส่งที่ความยาว 150 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 0.9994 % และ 0.9994 % ตามลำดับ ในสายส่งความยาว 300 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 2.02 % และ 2.02 % ตามลำดับ และที่ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 3.695 % และ 3.695 % ตามลำดับ

## 5. การจำลองระบบสายส่งจากชุดทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จำลองที่พิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดของโหลดที่เปลี่ยนนั้นมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของระบบ ไม่ว่าจะเป็น ค่าที่วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์ ค่าที่ต้นทางและปลายทางของสาย

ส่ง และค่าที่วัดที่โหลด โดยเมื่อต่อโหลดที่พิกัด 300 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 1.675 % และ 1.675 % ตามลำดับ เมื่อต่อโหลดที่มีพิกัด 750 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 3.754 % และ 3.754 % ตามลำดับ และเมื่อต่อโหลดที่มีพิกัด 1500 W มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 7.663 % และ 7.663 % ตามลำดับ

#### 6. การจำลองระบบสายจากชุดทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน จำลองที่พิกัดแรงดัน 450 V และ 500 V จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแรงดันในสายส่ง จะทำให้ปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆเปลี่ยนไป โดยเมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 450 V จะทำให้มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 4.467 % และ 4.467 % ตามลำดับ เมื่อทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 500 V จะทำให้มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 3.754 % และ 3.754 % ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถพัฒนาให้มีระบบจำลองความผิดพลาดในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยต้องใช้เรกติไฟเออร์ที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากพอ อินเวอร์เตอร์ที่สามารถทำงานได้ในสถานะที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ และ ขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้มากพอ
2. เนื่องจากข้อจำกัดของอินเวอร์เตอร์ในระบบจำลองให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 3 HP ดังนั้น ภาระทางไฟฟ้าที่จะนำมาใช้กับระบบจำลองไม่สามารถมีค่าเกิน 3 HP
3. ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณกับในระบบจำลองมีค่าไม่ตรงกัน จึงอาจทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้
4. ตู้ทดลองมีการระบายความร้อนด้วยพัดลมทางด้านหลัง การจัดวางจึงไม่ควรให้ด้านหลังตู้ชิดผนัง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Cordioli, D. Retzmann, and K. Uecker “Benefit of HVDC for System Intersection” *Energy Sector SIEMENS Power Transmission Division* (2008)
- [2] Chakraborty, Suprava, Pradip Kumar Sadhu, and Nitai Pal. “HVDC Application for Different Solar PV Technology Combinations in India.” *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering* 12.12 (2014)
- [3] Humpert, Christof. “Long distance transmission systems for the future electricity supply Analysis of possibilities and restrictions.” *Energy* 48.1 (2012): 278-83.
- [4] Sawicki, Jean-Paul, Pierre Petit, Abdallah Zégaoui, Michel Aillerie, and Jean-Pierre Charles. “High Efficiency Step-Up HVDC Converter for Photovoltaic Generator.” *Energy Procedia* 18 (2012): 1593-600.
- [5] P. Petit, M Aillerie, JP Sawicki, JP Charles. “Push-pull converter for high efficiency photovoltaic conversion”. *Energy Procedia*. 2012; 18: 1583–1592
- [6] G. Notton, V Lazarov, L Stoyanov. “Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations.” *Renewable Energy*. 2010; 35:541–554
- [7] "ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน เดือน ม.ค. - พ.ย. 2559 (ปีปฏิทิน) และ เดือน ต.ค. - พ.ย. 2559 (ปีงบประมาณ)." กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. N.p., n.d. Web. 20 Sep. 2017.
- [8] Radzuan, Roskhatijah, Mohd Azril Ab Raop, Mohd Khairul Mohd Salleh, Mustafar Kamal Hamzah, and Ruhaifi Abdullah Zawawi. “The Designs of Low Power AC-DC Converter for Power Electronics System Applications.” **2012 International Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE)** (2012), pp. 113-117.

- [9] Vobecky, J., V. Botan, K. Stiegler, U. Meier, and M. Bellini. "A Novel Ultra-low Loss Four Inch Thyristor for UHVDC." *2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)* (2015), pp. 413-416.
- [10] Mike Barnes, and Antony Beddard. "Voltage Source Converter HVDC Links – The state of the Art and Issues Going Forward." *Energy Procedia* 24 (2012): 108-122.
- [11] Friedrich, Kurt. "Modern HVDC PLUS Application of VSC in Modular Multilevel Converter Topology." *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (2010)
- [12] Si-Ye Ruan, Guo-Jie Li, Lin Peng, Yuan-Zhang Sun, and T.t. Lie. "A Nonlinear Control for Enhancing HVDC Light Transmission System Stability." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 29.7 (2007): 565-70.
- [13] H.F. Latorre, M. Ghandhari, and L. Söder. "Active and Reactive Power Control of a VSC-HVDC." *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, 2008, pp. 1756–1763.
- [14] B. Jacobson, P. Karlsson, G. Asplund, L. Harnefors, and T. Jonsson. "VSC-HVDC Transmission with Cascaded Two-Level Converters." *CIGR'E B4-110*, 2010.
- [15] Oluwafemi E. Oni, Innocent E. Davidson, and Kamati N.I. Mbangula. "A Review of LCC-HVDC and VSC-HVDC Technologies and Applications." *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (2016)
- [16] Latorre, H.f., and M. Ghandhari. "Improvement of Power System Stability by Using a VSC-HVDC." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 33.2 (2011)
- [17] Sellick, R.I., and M. Åkerberg. "Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme." *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)* (2012)

- [18] Jovic, Dragan, Lisa Lamont, and Keith Abbott. "Control System Design for VSC Transmission." *Electric Power Systems Research* 77.7 (2007): 721-29.
- [19] Zhang, Guibin, and Zheng Xu. "Steady-state Model for VSC Based HVDC and Its Controller Design." *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)* (n.d.)
- [20] Manohar, Premila, Vijetha Kelamane, Darshan Kaushik, and Wajid Ahmed. "Improved Controls for LCC-VSC Hybrid HVDC System." *2013 International Conference on Circuits, Controls and Communications (CCUBE)* (2013)
- [21] Xue, Ying, Dechao Kong, Ziming Song, V. Hamidi, and Xiao-Ping Zhang. "Development of an Advanced LCC-HVDC Model for Transmission System." *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission* (2015)
- [22] Lan, Hua, Tian-Gang Yuan, Mu-Zi Zhang, and Zhi-Min Liao. "HVDC Intelligent Controller." *Energy Procedia* 17 (2012): 1460-467.
- [23] Thepparat, Pakorn, Dietmar Retzmann, Emmanuel Ogee, and Markus Wiesinger. "Smart Transmission System by HVDC and FACTS." *2013 IEEE Grenoble Conference* (2013)
- [24] Zhang, Yuanze, Jayashri Ravishankar, John Fletcher, Rui Li, and Minxiao Han. "Review of Modular Multilevel Converter Based Multi-terminal HVDC Systems for Offshore Wind Power Transmission." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61 (2016): 572-86.
- [25] Li, Jianguo, Xiongguang Zhao, Qiang Song, Hong Rao, Shukai Xu, and Ming Chen. "Loss Calculation Method and Loss Characteristic Analysis of MMC Based VSC-HVDC System." *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (2013)
- [26] Pang, Hui, Guangfu Tang, and Zhiyuan He. "Evaluation of Losses in VSC-HVDC Transmission System." *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (2008)

- [27] Dinh, Minh-Chau, Sung-Kyu Kim, Jin-Geun Kim, Minwon Park, In-Keun Yu, and Byeongmo Yang. "Loss Characteristic Analysis of an HTS DC Model Cable Connected to a Model VSC-HVDC System." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23.3 (2013): 5900305
- [28] Gan, Chin Kim, Yi Ming Lee, Danny Pudjianto, and Goran Strbac. "Role of Losses in Design of DC Cable for Solar PV Applications." *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (2014)
- [29] F. M. Kasangala, and G. Atkinson-Hope. "Electrical energy losses and costs evaluation of HVDC and UHVDC transmission lines" *Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 2013 Proceedings of the 10<sup>th</sup>* (2013)
- [30] Yin, Fanghui, Masoud Farzaneh, and Xingliang Jiang. "A Finite Element Approach to Calculate Corona Losses on Bipolar DC Transmission Lines." *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (2015)
- [31] Senjyu, T., K. Kurohane, J. Miyagi, and N. Urasaki. "Low-loss HVDC Transmission System with Self-commutated Power Converter Introducing Zero-current Soft-switching Technique." *IET Generation, Transmission & Distribution* 3.4 (2009): 315
- [32] Sanz, I., M. Moranchel, S. Fernandez, F. J. Rodriguez, and J. Perez. "Reconfiguration Algorithm to Reduce Power Losses in Offshore HVDC Transmission Lines." *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)* (2014)
- [33] Wang, Feng, Zheng Xu, Ying Huang, and Xiaolin Li. "DC Harmonic Current Calculation for HVDC Systems Based on the Classical Transmission Line Model." *2010 International Conference on Power System Technology* (2010)
- [34] You, M., B.h. Zhang, L.y. Cheng, Z.q. Bo, and A. Klimek. "Lightning Model for HVDC Transmission Lines." *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change* (2010)

- [35] Khatir, M., S. A. Zidi, M. K. Fellah, S. Hadjeri, and O. Dahou. "HVDC Transmission Line Models for Steady-State and Transients Analysis in SIMULINK Environment." *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics* (2006)
- [36] Moharana, Akshaya, Rajiv K. Varma, and Ravi Seethapathy. "Modal Analysis of Type-1 Wind Farm Connect." *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference* (2012)
- [37] Zhang, Xiaohu, Jialin Bai, Guoyun Cao, and Chen Chen. "Optimizing HVDC Control Parameters in Multi-infeed HVDC System Based on Electromagnetic Transient Analysis." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **49** (2013): 449-54.
- [38] Haibo, Zhang, Francois Gruson, Diana Florez, and Christophe Saudemont. "Analysis of the Influence of Different Cable Modelling for DC Series Offshore Wind Farm." *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)* (2016)
- [39] Akkari, Samy, Eduardo Prieto-Araujo, Jing Dai, Oriol Gomis-Bellmunt, and Xavier Guillaud. "Impact of the DC Cable Models on the SVD Analysis of a Multi-Terminal HVDC System." *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)* (2016)
- [40] Beddard, A., and M. Barnes. "HVDC Cable Modelling for VSC-HVDC Applications." *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition* (2014)
- [41] Sabatier, Jocelyn, Toni Youssef, and Mathieu Pellet. "HVDC Line Parameters Estimation Based on Line Transfer Functions Frequency Analysis." *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (2015)
- [42] Liu, Pu, Renfei Che, Yijing Xu, and Hong Zhang. "Detailed Modeling and Simulation of 500kV HVDC Transmission System Using PSCAD/EMTDC." *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* (2015)

- [43] Li, Xiao-Hua, Fei Long, Ze-Xiang Cai, and Lin Zhu. "Modeling and Analysis of Large Scale Power System with Multi-infeed HVDC by EMTDC." *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (2010)
- [44] Khatir, M., S. A. Zidi, M. K. Fellah, S. Hadjeri, and O. Dahou. "HVDC Transmission Line Models for Steady-State and Transients Analysis in SIMULINK Environment." *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics* (2006)
- [45] Cao, Xin, Shenglin Wang, and Lei Chen. "Overvoltage Study of a Real HVDC Project Based MATLAB." *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)* (2013)
- [46] Liu, Xudan, Andreas Lindemann, Steffen Rabe, Marc Richter, and Zbigniew A. Styczynski. "Design and Control of a Small-scale HVDC Lab Prototype." *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)* (2014)
- [47] "ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน เดือน ม.ค. - พ.ย. 2559 (ปีปฏิทิน) และ เดือน ต.ค. - พ.ย. 2559 (ปีงบประมาณ)." กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. N.p., n.d. Web. 20 Sep. 2017.
- [48] บุญชาติ เนติศักดิ์. "เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อระบบพลังงานที่ยั่งยืน" *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง* 4(2),78-91 ตุลาคม 2554 – มีนาคม 2555.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

### Development of Experimental Set For High Voltage Direct Current Transmission Systems

วรพล หิริญพพิทักษ์, ศิริวิชญ์ โพธิ์ศรีทอง, สมภูมิ จินดาบรรเจิด และ อลงกรณ์ ไกรเทพ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

E-mail: worapol.boom@gmail.com, sirawichful@hotmail.com, sp.chinda@hotmail.com, alongkorn.kraitep@gmail.com

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการสร้างชุดทดลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางคืนกลับไฟฟ้าเป็นโลหะ ซึ่งชุดทดลองมีการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสในห้องปฏิบัติการแรงดัน 380 V นำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยรกติไฟเออร์ (Rectifier) ก่อนส่งผ่านชุดจำลองสายส่ง การส่งจ่ายกระแสตรงผ่านสายส่งก่อนเข้าโหลดจะทำการแปลงกลับเป็นกระแสสลับอีกครั้งผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการทดลองจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้สวิตช์ปรับเลือกค่าเพื่อจำลองความยาวของสายส่งตั้งแต่ 150 – 600 กิโลเมตร โดยทำการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของสายส่งที่ความยาวสายระยะต่าง ๆ ขณะจ่ายโหลด และพฤติกรรมของสายส่งเมื่อเปลี่ยนชนิดโหลด

**คำสำคัญ:** การส่งจ่ายไฟฟ้า, ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง, ระบบสายส่งไฟฟ้า

#### Abstract

This project presents HVDC (High Voltage Direct Current Transmission Line) experiment set. By using monopolar with metal return path. The experiment set have been supplied by 2 types of source, which have three phase voltage source 400 V from operation room then transform AC voltage to DC voltage by using rectifier, and "Terra SAS photovoltaic Simulator ETS 600/8" for supply DC voltage. Before transmits current to loads on terminal, there have to transform DC current to AC current by using inverter. In experiment, there have to be adjusted transmission line's parameters by selector switch multiple steps for simulate HVDC transmission line model at distance from 150 - 600 km.

For studied about fault on transmission line, Behavior of transmission line at different distances during supply load, and when the load type change.

**Keywords:** hvdc, transmission line, high voltage direct current, transmission systems

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission : HVDC Transmission) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ได้เปรียบกว่าระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง เช่น ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ง่ายต่อการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า ระยะทางไกลแต่ต้นทุนต่ำ และความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระยะไกล [1] เป็นต้น เทคโนโลยีระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเริ่มเข้ามามีบทบาทในประเทศไทยมากขึ้น นอกจากระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้ากูรุน (Gurun) ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (Tenaga Nasional Berhad : TNB) และสถานีไฟฟ้าคลองแงะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งอีกหนึ่งโครงการคือ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของประเทศไทย Jinghong-Thailand ที่มีแผนการจะสร้างเชื่อมต่อกับประเทศไทย คั้งนั้นผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ที่จะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคต จึงมีความจำเป็นต้องให้ความสนใจ เพื่อให้การศึกษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถเรียนรู้ทั้งเชิงทฤษฎีและปฏิบัติไปพร้อมกัน การพัฒนาชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้ ทำการศึกษากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง พารามิเตอร์ความต้านทานไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า ในสายส่งระบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และทำการศึกษาพฤติกรรมแรงดันและกระแสที่ได้จากการจำลอง โดย

จำลองที่แรงดัน base 450 V และ 500 V ที่ความยาวสายส่ง 150 km 300 km และ 600 km ตามลำดับ ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink [2-3]

## 2. การคำนวณค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง และการจำลองระบบ

ในการจำลองระบบสายส่ง ต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ซึ่งได้จากการคำนวณ

### 2.1 การคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลอง

อัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลองคำนวณเพื่อปรับค่าเทียบระหว่างพารามิเตอร์จากระบบจริงให้นำมาใช้ในระบบจำลองแทนได้ โดยปรับได้ดังนี้

แรงดัน Base 450 V มีอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจำลองต่อระบบจริงเท่ากับ  $\frac{270}{300} = 0.9$

แรงดัน Base 500 V มีอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจำลองต่อระบบจริงเท่ากับ  $\frac{333.33}{300} = 1.1111$

### 2.2 การคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า (R)

ในการหาค่าความต้านทานเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความต้านทานต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.015 ( $\Omega/\text{km}$ ) จากงานวิจัย [4] โดยยกตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น  $0.25 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 0.50625 \Omega$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น  $0.50 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 1.0125 \Omega$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น  $0.75 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 1.51875 \Omega$

### 2.3 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L)

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตร โดยในการทดลอง

นี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.792 (mH/km) จากงานวิจัย [4] โดยยกตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น  $0.25 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 53.46 \text{ mH}$  ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 53 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น  $0.50 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 106.92 \text{ mH}$  ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 107 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น  $0.75 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 160.38 \text{ mH}$  ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 160 mH

### 2.4 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้า (C)

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้าต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ  $0.0144/2 = 0.0072$  ( $\mu\text{F}/\text{km}$ ) จากงานวิจัย [4] โดยยกตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น  $0.25 \times 600 \times 0.0072/1.1111 = 0.972 \mu\text{F}$  บัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น  $0.50 \times 600 \times 0.0072/1.1111 = 1.944 \mu\text{F}$  บัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 2  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น  $0.75 \times 600 \times 0.0072/1.1111 = 2.916 \mu\text{F}$  บัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 3  $\mu\text{F}$

## 3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองนี้เกิดจากการนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 2 มาสร้างชุดทดลองขึ้น โดยแสดงผลการทดลองในกรณีที่ 1 กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง ทดลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร กรณีที่ 2 กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด ทดลองที่พิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W และกรณีที่ 3 พิกัดโหลด 750 W

ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดันสายส่ง ทดลอง ที่พิกัดแรงดัน 450 และ 500 V



รูปที่ 1 ชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

### 3.1 กรณีที่ 1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง วัดที่ต้นทาง และปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	ความยาวสายส่ง (km)		
		150	300	600
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	500.3	500	500.7
แรงดันขาออกสายส่ง	V	495.3	489.9	482.2
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.4	1.5	1.6
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.4	1.5	1.6
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	700.42	750	801.12
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	693.42	734.85	771.52

จากตารางที่ 1 แสดงถึงค่าแรงดันขาเข้าสายส่ง แรงดันขาออกสายส่ง กระแสขาเข้าสายส่ง กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง และ กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง จะเห็นว่าที่ความยาวสายส่ง 150 กิโลเมตร ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 0.9994 % ที่ความยาวสายส่ง 300 กิโลเมตร ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 2.020 % และที่ความยาวสายส่ง 500 กิโลเมตร ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 3.695 % แสดงให้เห็นว่าความยาวสายส่งมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น

### 3.2 กรณีที่ 2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	โหลด (W)		
		300	750	1500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	495.5	498.2	501.1
แรงดันขาออกสายส่ง	V	487.2	479.5	462.7
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	0.5	1.4	3.1
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	0.5	1.4	3.1
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	247.75	697.48	1553.41
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	243.6	671.3	1434.37

จากตารางที่ 2 แสดงถึงค่าแรงดันขาเข้าสายส่ง แรงดันขาออกสายส่ง กระแสขาเข้าสายส่ง กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง และ กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง จะเห็นว่าที่พิกัดโหลด 300 W ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 1.675 % ที่พิกัดโหลด 750 W ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 3.754 % และที่พิกัดโหลด 1500 W ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 7.663 % แสดงให้เห็นว่าความยาวสายส่งมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งเพิ่มขึ้น

### 3.3 กรณีที่ 3 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง วัดที่ต้นทาง และปลายทางของสายส่ง

ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันขาเข้าสายส่ง	V	450	498.2
แรงดันขาออกสายส่ง	V	429.9	479.5
กระแสขาเข้าสายส่ง	A	1.6	1.4
กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง	A	1.6	1.4
กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	720	697.48
กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	687.84	671.3

จากตารางที่ 3 แสดงถึงค่าแรงดันขาเข้าสายส่ง แรงดันขาออกสายส่ง กระแสขาเข้าสายส่ง กระแสไฟฟ้าขาออกสายส่ง กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง และ กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง จะเห็นว่าที่พิกัดแรงดัน 450 V ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 4.467 % และที่พิกัดแรงดัน 500 V ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง 3.754 % แสดงให้เห็นว่าพิกัดแรงดันสูงขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งลดลง และโหลดได้รับกำลังไฟที่สูงขึ้น

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากหัวข้อที่ 3.1 3.2 และ 3.3 การทดลองทั้ง 3 กรณี แสดงให้เห็นว่า ความยาวสายส่งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียในสายส่งเพิ่มขึ้น พิกัดโหลดที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียในสายส่งเพิ่มขึ้น แต่แรงดันขาเข้าสายส่งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียในสายส่งลดลง

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Petit, M Aillerie, JP Sawicki, JP Charles. "Push-pull converter for high efficiency photovoltaic conversion". Energy Procedia. 2012; 18: 1583–1592.
- [2] Chakraborty, Suprava, Pradip Kumar Sadhu, and Nitai Pal. "HVDC Application for Different Solar PV Technology Combinations in India." TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering 12.12 (2014)
- [3] G. Cordioli, D. Retzmann, and K. Uecker "Benefit of HVDC for System Intersection" Energy Sector SIEMENS Power Transmission Division (2008)
- [4] Khatir, M., S. A. Zidi, M. K. Fellah, S. Hadjeri, and O. Dahou. "HVDC Transmission Line Models for Steady-State and Transients Analysis in SIMULINK Environment." IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics (2006)

#### ประวัติผู้เขียน



นายวรพล หิรัญพรพิทักษ์ (บุณ)  
เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2538  
ที่อยู่ 201/315 หมู่ 7 ถ.บางนา-ตราด ด.บางเสาธง  
อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ 10540  
จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว  
เบอร์โทรศัพท์ 095-249-9439  
E-mail address: worapol.boom@gmail.com



นายศิริวิชญ์ โพธิ์ศรีทอง (โอม)  
เกิดวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2538  
ที่อยู่ 101/15 ถ.ศรีธรรมไตรปิฎก ด.ในเมือง  
อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000  
จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี  
เบอร์โทรศัพท์ 088-272-4016  
E-mail address: sirawichful@hotmail.com



นายสมภูมิ จินดาบรรเจิด (ภูมิ)  
เกิดวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2537  
ที่อยู่ 50/481 หมู่ 2 ถ.ศรีนครินทร์ ด.บางแก้ว  
อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540  
จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว  
เบอร์โทรศัพท์ 089-613-1099  
E-mail address: sp.chinda@hotmail.com



นายอลงกรณ์ ไกรเทพ (ป๊อบ)  
เกิดวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2538  
ที่อยู่ 20/2 ถ.บางรัก ต.ทับเที่ยง อ.เมือง จ.ตรัง 92000  
จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสภาราชินี  
เบอร์โทรศัพท์ 098-275-9392  
E-mail address: alongkorn.kraitep@gmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1 อัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลอง

อัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลองคำนวณเพื่อปรับค่าเทียบระหว่างพารามิเตอร์จากระบบจริงให้นำมาใช้ในระบบจำลองแทนได้ โดยปรับได้ดังนี้

แรงดัน Base 450 V

$$\text{มีอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจำลองต่อระบบจริงเท่ากับ } \frac{270}{300} = 0.9$$

แรงดัน Base 500 V

มีอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจำลองต่อระบบจริงเท่ากับ

$$\frac{333.33}{300} = 1.1111$$

### ข.2 การหาค่าความต้านทาน (R) [41]

ในการหาค่าความต้านทานเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความต้านทานต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.015 ( $\Omega/\text{km}$ ) จากงานวิจัย [41] ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในระบบจำลองตัวอย่าง Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW ของโปรแกรม MATLAB โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 0.50625 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 1.0125 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 150 \times 0.015 \times 0.9 = 1.51875 \Omega$$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 300 \times 0.015 \times 0.9 = 1.0125 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 300 \times 0.015 \times 0.9 = 2.025 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 300 \times 0.015 \times 0.9 = 3.0375 \Omega$$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 600 \times 0.015 \times 0.9 = 2.025 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 600 \times 0.015 \times 0.9 = 4.05 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 600 \times 0.015 \times 0.9 = 6.075 \Omega$$

ที่แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 150 \times 0.015 \times 1.1111 = 0.625 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 150 \times 0.015 \times 1.1111 = 1.25 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 150 \times 0.015 \times 1.1111 = 1.875 \Omega$$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 300 \times 0.015 \times 1.1111 = 1.25 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 300 \times 0.015 \times 1.1111 = 2.5 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 300 \times 0.015 \times 1.1111 = 3.75 \Omega$$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.25 \times 600 \times 0.015 \times 1.1111 = 2.5 \Omega$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.50 \times 600 \times 0.015 \times 1.1111 = 5 \Omega$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

$$0.75 \times 600 \times 0.015 \times 1.1111 = 7.5 \Omega$$

### ข.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) [41]

ในการหาค่าความเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความเหนี่ยวนำต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.792 (mH/km) จากงานวิจัย [41] ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในระบบจำลองตัวอย่าง Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW ของโปรแกรม MATLAB โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 26.73 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 27 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 53.46 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 53 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 80.19 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 80 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 53.46 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 53 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 106.92 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 107 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 160.38 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 160 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 106.92 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 107 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 213.84 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 214 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 320.76 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 320 mH

ที่แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 33 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 30 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 66 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 65 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 99 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 95 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 66 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 65 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 132 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 130 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 198 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 195 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 132 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 130 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 264 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 260 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 396 \text{ mH}$$

ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 395 mH

#### ข.4 การหาค่าความจุไฟฟ้า (C) [41]

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้าต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ  $0.0144/2 = 0.0072$  ( $\mu\text{F}/\text{km}$ ) จากงานวิจัย [41] ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในระบบจำลองตัวอย่าง Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW ของโปรแกรม MATLAB โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.3 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.27  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.6 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.9 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.8  $\mu\text{F}$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.6 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.9} = 1.2 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.4} = 1.8 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1.5  $\mu\text{F}$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.9} = 1.2 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.4} = 2.4 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 2  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.9} = 3.6 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 3  $\mu\text{F}$

แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.243 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.27  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.486 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.729 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.8  $\mu\text{F}$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.486 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.972 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 1.458 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1.5  $\mu\text{F}$

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.25 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.972 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1  $\mu\text{F}$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.50 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 1.944 \mu\text{F}$$

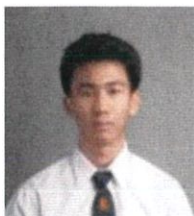
ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 2  $\mu\text{F}$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$0.75 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 2.916 \mu\text{F}$$

ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 3  $\mu\text{F}$

## ประวัติผู้เขียน



นายวรพล หิรัญพรพิทักษ์ (บูม)

เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2538

ที่อยู่ 201/315 หมู่ 7 ถ.บางนา-ตราด ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง

จ.สมุทรปราการ 10540

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว

เบอร์โทรศัพท์ 095-249-9439

E-mail address: worapol.boom@gmail.com



นายศิริวิชญ์ โพธิ์ศรีทอง (โอม)

เกิดวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2538

ที่อยู่ 101/15 ถ.ศรีธรรมไตรปิฎก ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี

เบอร์โทรศัพท์ 088-272-4016

E-mail address: sirawichful@hotmail.com



นายสมภูมิ จินดาบรรเจิด (ภูมิ)

เกิดวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2537

ที่อยู่ 50/481 หมู่ 2 ถ.ศรีนครินทร์ ต.บางแก้ว อ.บางพลี

จ.สมุทรปราการ 10540

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว

เบอร์โทรศัพท์ 089-613-1099

E-mail address: sp.chinda@hotmail.com



นายอลงกรณ์ ไกรเทพ (ป๊อบ)

เกิดวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2538

ที่อยู่ 20/2 ถ.บางรัก ต.ทับเที่ยง อ.เมือง จ.ตรัง 92000

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสภาราษินี

เบอร์โทรศัพท์ 098-275-9392

E-mail address: alongkorn.kraitep@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้