



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มี
พลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่
Modelling and Analysis of High Voltage Direct Current
Transmission Systems

นายอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

นายชัยยันต์ เจตนาเสน

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มี
พลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

Modelling and Analysis of High Voltage Direct Current
Transmission Systems integrated with renewable energy

นายอรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

นายชัยยันต์ เจตนาเสน

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มี
พลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ประจำ ปีงบประมาณ..... พ.ศ. 2561..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 484,500..... บาท

ระยะเวลา ทดสอบ..... 1..... ปี ตั้งแต่..... ตุลาคม พ.ศ. 2560..... ถึง..... กันยายน พ.ศ. 2561.....

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล หน่วยงานต้นสังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน หน่วยงานต้นสังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาองค์ประกอบและคุณภาพไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTD-RV และการสร้างชุดทดลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับไฟฟ้าเป็นโลหะ ซึ่งชุดทดลองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสในห้องปฏิบัติการแรงดัน 400 V จากนั้นนำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเรกติไฟเออร์ (Rectifier) ก่อนส่งผ่านชุดจำลองสายส่ง หลังจากส่งจ่ายกระแสตรงผ่านสายส่งนั้นทำการแปลงกลับเป็นกระแสสลับอีกครั้งด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการทดลองทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งโดยใช้สวิตช์ปรับเลือกค่าเพื่อจำลองความยาวของสายส่งที่ระยะต่าง ๆ โดยในการศึกษาได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า และก ล้างไฟฟ้้า (ก ล้างไฟฟ้้าจริง ก ล้างไฟฟ้้าเสมือน และก ล้างไฟฟ้้าปรากฏ) ของสายส่งที่ระยะความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร มีการเปลี่ยนพิกัดแรงดันกระแสตรงที่ใช้ในสายส่งเป็น 450 และ 500 โวลต์ และเปลี่ยนปริมาณโหลดเป็น 300 700 และ1500 วัตต์ เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางคุณภาพไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTD-RV พบว่าเมื่อระยะของสายส่งมากขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกในสายส่งสูงขึ้นเป็นสัดส่วนตามความยาวสายที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนพิกัดแรงดันกระแสตรงที่ใช้ในสายส่งมีนัยส าคัญต่อระบบน้อย และการเปลี่ยนปริมาณโหลดให้มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ก ล้างไฟฟ้้าสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าตกในสายส่งเพิ่มมากขึ้น สำหรับการทดสอบด้วยชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง พบว่าเมื่อระยะความยาวของสายส่งหรือปริมาณโหลดมากขึ้นส่งผลให้ก ล้างไฟฟ้้าสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าตกในสายส่งสูงขึ้นตามไปด้วย และการเปลี่ยนพิกัดแรงดันกระแสตรงที่ใช้ในสายส่งมีผลต่อก ล้างไฟฟ้้าสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าตกในสายส่ง

คำสำคัญ : ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง, คุณภาพไฟฟ้า, เรกติไฟเออร์, อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Modelling and Analysis of High Voltage Direct Current Transmission Systems integrated with renewable energy

Researcher: Assoc. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul **Faculty:** Electrical Engineering...

Department: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.....

Asst. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen..... **Faculty:** Electrical Engineering...

Department: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.....

ABSTRACT

This research presents the study of the components and power quality of the high voltage direct current transmission line (HVDC) using a PSCAD / EMTDC or EMTP-RV program and a laboratory experimental setup. The transmission line is a monopolar HVDC which It has an electric back path as a metal. The 400 V three-phase alternating current source is used to supply the electrical power to the experimental setup. Next, a rectifier converts the alternating current into a direct current and sent to the HVDC transmission line. When the power passes the transmission line, an inverter is used to convert the direct current to a three-phase alternating current and then sent it to loads. Parameters of the HVDC transmission line are adjusted by twelve rotary switches to simulate the transmission line in each distance. This research study the characteristics of voltage, current, and power (active power, reactive power, and apparent power) of the transmission line at the transmission line length of 150, 300, and 600 km. The DC voltage used in the transmission line is 450 and 500 volts and loads are changed to 300, 700, and 1500 watts to compare the electrical quality characteristics of HVDC. The results from the PSCAD/EMTDC program show that the increase in the transmission distance results in a higher proportion of the voltage drop in the transmission line. The Changing of DC voltage used in the transmission line affects very few systems and the increase of load results in more power losses and voltage drops in the transmission line. In the HVDC experimental setup, the increase in the transmission distance and loads results in a higher proportion of power losses and voltage drops. The Changing of DC voltage more affect to the power loss and voltage drop in the transmission line.

Keyword: High Voltage Direct Current Transmission Line (HVDC), Power quality, Rectifier, Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความกรุณาและได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2.....	7
2.1 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	7
2.2 รูปแบบของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	7
2.3 คอนเวอร์เตอร์(Converter).....	11
2.3.1 คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด.....	11
2.3.2 คอนเวอร์เตอร์ควบคุมได้.....	13
2.4 ตัวกรองไฟฟ้า.....	17
2.4.1 ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Filter).....	17
2.4.2 จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter).....	17
2.4.3 ตัวกรองไฟฟ้ากระแสตรง.....	18
2.5 พารามิเตอร์สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	18
2.6 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	18
2.7 ระบบเปอร์ยูนิต (Per-Unit System).....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3	21
3.1 การออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	21
3.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ	23
3.1.2 อุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง	23
3.1.3 คอนเวอร์เตอร์	24
3.1.4 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	25
3.1.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลอง	26
3.1.6 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าของแบบจำลอง	27
3.1.7 การออกแบบตัวต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลอง	29
3.1.8 โหลดของระบบ	31
3.2 การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
3.2.1 การจำลองระบบตัวอย่างระบบ Simple 6-Pulse 500 MW	32
3.2.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง	33
3.3 การทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	40
บทที่ 4	42
4.1 การจำลองระบบสายส่งของชุดทดลอง	42
4.1.1 ระบบตัวอย่างจำลองระบบ Simple 6-Pulse 500 MW	42
4.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 450 V 750 W	46
4.1.3 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 500 V 750 W	50
4.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง	54
4.2.1 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง	54
4.2.2 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	67
4.2.3 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง	76
4.3 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	86
4.3.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง	86
4.3.2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	95
4.3.3 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5	112
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
เอกสารอ้างอิง	115
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก.....	121
ภาคผนวก ข.....	127
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	127
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	128



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจ ลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	27
ตารางที่ 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแบบจ ลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	28
ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแบบจ ลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ	30
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบข้อมูลของระบบตัวอย่างและระบบที่ออกแบบ	33
ตารางที่ 4.1 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V 750 W วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และเรกติไฟเออร์	55
ตารางที่ 4.2 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	56
ตารางที่ 4.3 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V 750 W วัดที่โหลด	57
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบก ลังไฟฟ้าจริงที่วัดต ณแห่งต่าง ๆ จากการจ ลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง	58
ตารางที่ 4.5 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	68
ตารางที่ 4.6 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	68
ตารางที่ 4.7 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	69
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบก ลังไฟฟ้าจริงที่วัดต ณแห่งต่าง ๆ จากการจ ลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	70
ตารางที่ 4.9 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และเรกติไฟเออร์	77
ตารางที่ 4.10 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง	78
ตารางที่ 4.11 ปริมาณทางไฟฟ้าพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	79
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบก ลังไฟฟ้าจริงที่วัดต ณแห่งต่าง ๆ จากการจ ลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน	79
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V 750 W วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V 750 W วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง.....	88
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V 750 W วัดที่โหลด	89
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง	90
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	96
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง.....	97
ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	98
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด	99
ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์	105
ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง.....	106
ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองจากชุดทดลองพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด	107
ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่ง เมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน.....	108

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงตำแหน่งสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อประเทศไทย-มาเลเซีย [1]	2
รูปที่ 1.2 สถานีส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อประเทศไทย-มาเลเซีย [2]	2
รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	7
รูปที่ 2.2 คอนเวอร์เตอร์แบบคัททูแบค (Back-to-Back Converter)	8
รูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดิน	8
รูปที่ 2.4 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะ	8
รูปที่ 2.5 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะทำงานในสภาวะปกติ.....	9
รูปที่ 2.6 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับขั้วใดขั้วหนึ่ง.....	9
รูปที่ 2.7 ระบบส่งกำลังแบบขั้วคู่ (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับคอนเวอร์เตอร์.....	10
รูปที่ 2.8 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว มีทางเดินกลับเป็นโลหะและทำงานแบบขั้วเดียว.....	10
รูปที่ 2.9 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว ที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับและทำงานแบบขั้วเดียว.....	11
รูปที่ 2.10 คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด.....	11
รูปที่ 2.11 ลำดับการนำกระแสของไดโอด	12
รูปที่ 2.12 การคอมมิวเตชันขณะคอนเวอร์เตอร์ทำงาน	12
รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติไฟเออร์.....	13
รูปที่ 2.14 คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมจุดชนวน.....	14
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของเรกติไฟเออร์.....	14
รูปที่ 2.16 คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์	15
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์	16
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลแบบพาย (π) ของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	18
รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบจลของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	21
รูปที่ 3.2 แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง.....	22
รูปที่ 3.3 หม้อแปลงสามเฟสปรับค่าได้พิกัด 30A 0 - 420Vac	23
รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันชุดทดลอง	24
รูปที่ 3.5 คอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดัน	24
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	25
รูปที่ 3.7 ด้านหน้าชุดทดลองระบบสายส่ง	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.8 ด้านหลังชุดทดลองระบบสายส่ง	26
รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ	26
รูปที่ 3.10 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลเวอร์ไมก้า	28
รูปที่ 3.11 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดก ล้าง200 W	29
รูปที่ 3.12 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์วาวด์พิกัดก ล้าง1000 W	29
รูปที่ 3.13 วงจรของโหลดแต่ละเฟสที่ใช้ในการทดลอง	31
รูปที่ 3.14 โหลดของชุดทดลองระบบสายส่ง	31
รูปที่ 3.15 ระบบจ่ายแรงดันระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW	32
รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมภายในระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ	33
รูปที่ 3.17 แบบจ่ายแรงดันระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง	34
รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของแหล่งจ่าย	35
รูปที่ 3.19 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส	35
รูปที่ 3.20 ไดอะแกรมภายในของระบบย่อยของหม้อแปลง	36
รูปที่ 3.21 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด	36
รูปที่ 3.22 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์ สำหรับวัดค่าไฟเออร์	37
รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมมุมจุดชนวน	37
รูปที่ 3.24 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง	38
รูปที่ 3.25 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์	38
รูปที่ 3.26 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมพีดับเบิลยูเอ็ม	39
รูปที่ 3.27 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของโหลด	39
รูปที่ 3.28 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของโหลด	40
รูปที่ 3.29 ไดอะแกรมเส้นเดียวของการทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ	41
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW	45
รูปที่ 4.2 ระบบจ่ายแรงดันระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง	46
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W	49
รูปที่ 4.4 ระบบจ่ายแรงดันระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 4.30	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W.....	103
รูปที่ 4.31	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W.	103
รูปที่ 4.32	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V.....	108
รูปที่ 4.33	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V...	109
รูปที่ 4.34	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V.....	110
รูปที่ 4.35	รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V...	110



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission System: HVDC) เป็นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการส่งกำลังไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงถูกสาธิตเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1882 ที่สถานีไมส์บาค-มิวนิก ส่งกำลังไฟฟ้าได้ 2 กิโลวัตต์ ในระยะทาง 50 กิโลเมตรเท่านั้น ต่อมาในปี ค.ศ.1889 วิศวกรชาวสวิสเซอร์แลนด์ชื่อ René Thury ได้พัฒนาวิธีส่งจ่ายการสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยระบบของ Thury นี้สามารถส่ง กำลังไฟฟ้าได้ 20 MW ที่แรงดัน 125 kVdc ระยะทาง 230 km ส่งระหว่างเมือง Moutiers ไปยังเมือง Lyon แต่ในสมัยนั้นประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์น้อยเพราะระบบที่ Thury คิดค้นนั้นต้องการการบำรุงรักษาสูง และการแปลงแรงดันกระแสตรงให้สูงยังเป็นเรื่องยาก แต่ต่อมาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics) มีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้การแปลงแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้นนั้นทำได้ง่ายขึ้น จึงเป็นต้นแบบในการพัฒนาให้ในช่วงระหว่างปี 1890 – 1980 ได้เกิดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในเชิงพาณิชย์ขึ้นหลายแห่ง อาทิ เช่น ในปี 1941 มีการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 60 MW ไปยังเมือง Berlin ประเทศเยอรมัน ในปี 1945 ที่เกาะ Gotland ประเทศสวีเดน และในปี 1979 มีการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 600 kV 6,300 MW ไปยังเมือง Itaipu ประเทศบราซิล ซึ่งจะเห็นได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงมีการพัฒนาอย่างมาก ทั้งในด้านการเพิ่มกำลังการส่งและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า สาเหตุที่หลายๆประเทศให้ความสนใจในการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงมากขึ้นเพราะมีความได้เปรียบกว่าการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในหลายๆด้าน เช่น มีความสูญเสียต่ำ เพราะไม่เกิดปัญหาเรื่องค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า ทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการส่งหรือความยาวของสายเคเบิล อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าจากสองแหล่งจ่ายเข้าด้วยกันได้อย่างสะดวก และระบบการส่งไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า รวมถึงการสลับทิศทางไหลได้อย่างรวดเร็ว ดังเช่นการส่งไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อระหว่างสถานีคลองแวง จังหวัดสงขลา ประเทศไทย กับสถานีกูรุน รัฐเคห์ต้า ประเทศมาเลเซียมีขนาดแรงดัน 300 kV ส่งจ่ายกำลัง 300 MW ระยะทาง 110 กิโลเมตร เป็นลักษณะการส่งกำลังระยะไกลแบบขั้วเดียว (Monopolar Long-distance Transmissions) เป็นการสลับกันแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเนื่องจากทั้ง 2 ประเทศมีช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าสูงสุดไม่ตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1

รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงตำแหน่งสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อประเทศไทย-มาเลเซีย [1]



รูปที่ 1.2 สถานีส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อประเทศไทย-มาเลเซีย [2]

นอกจากนี้ประเทศไทยและจีนได้ร่วมกันลงนามในบันทึกความเข้าใจ เรื่องการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างไทยกับสาธารณรัฐประชาชนจีน ขนาด 1200 MW 500kV เริ่มจากมณฑลยูนนาน บริเวณจีนตอนใต้ ผ่าน สปป.ลาว ที่เมืองสิงห์ และเมืองหลวงน้ำทา ข้ามแม่น้ำโขง ผ่านมายังชายแดนไทยที่อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย และจะสิ้นสุดที่อ. กอท่าม่วง จังหวัดลพบุรี ทั้งนี้ระยะทางของสายส่งมีความยาวรวมทั้งสิ้น 1,055 กิโลเมตร ซึ่งคาดการณ์ว่าจะใช้การส่งจ่ายระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เนื่องจากมีระยะทางไกลและกำลังส่งจ่ายสูง ซึ่งจะเห็นว่าการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเริ่มมีความสำคัญและมีการนำมาใช้ในประเทศไทยเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยระบบนี้ให้มาก เพื่อรองรับการใช้งานและพัฒนาศักยภาพของระบบให้มีความมั่นคงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ปัจจุบันมีชุดทดลองที่เกี่ยวกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอยู่น้อย อีกทั้งประเทศไทยยังมีผู้ที่ทำการศึกษาด้านนี้ไม่เพียงพอต่อการพัฒนา ทำให้ขาดความรู้ความเข้าใจที่มีต่อระบบนี้ การขยายหรือเพิ่มเติมระบบอาจทำได้ล่าช้า เมื่อเกิดปัญหาที่ระบบขึ้นจะไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ทันเวลาที่ ดังนั้นการพัฒนาชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนี้ จึงเป็นหนทางที่สามารถตอบสนองความต้องการในด้านการศึกษาวิจัย การแก้ปัญหา และการวางแผนการสร้างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในอนาคตอีกด้วย การพัฒนาชุดทดลองนี้จึงไม่เพียงจะเกิดประโยชน์แก่ผู้วิจัยเองเท่านั้น แต่ยังเป็นประโยชน์ต่อสังคม และประเทศชาติด้วย ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีในปัจจุบันและอาจเกิดขึ้นในอนาคต จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขึ้น โดยการพัฒนาชุดทดลองนี้ จะต้องทำการศึกษากการแปลงไฟฟ้าระหว่างกระแสสลับและกระแสตรง พารามิเตอร์ความต้านทาน - ความเหนี่ยวนา - ความจุไฟฟ้าในสายส่งระบบไฟฟ้ากระแสตรง และการใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTP-RV ในการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อที่จะนำมาออกแบบเป็นชุดทดลองจริง ทำการศึกษาเสถียรภาพด้านคุณภาพไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยไฟฟ้ากระแสตรงได้รับจากเซลล์สุริยะหรือเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
3. เพื่อศึกษาและออกแบบจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTP-RV
4. เพื่อศึกษาด้านกำลังไฟฟ้าสูญเสียและด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้นาเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าตกในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และศึกษาปริมาณทางไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของระบบ โดยนำข้อมูลผลการทดลองและการจำลองทางโปรแกรม PSCAD/EMTDC ที่ได้มาวิเคราะห์

การดำเนินการวิจัยตลอดโครงการ มีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในทุกๆด้าน ได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTP-RV เบื้องต้น เพื่อใช้ในการจำลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
3. ออกแบบและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อใช้ในการจำลองระบบทั้งในโปรแกรม PSCAD/EMTDC และชุดทดลอง
4. จำลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTP-RV เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ
5. วิเคราะห์ผลการจำลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ EMTP-RV
6. ออกแบบและจัดซื้ออุปกรณ์ประกอบชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน โดยจำลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
7. ดำเนินการประกอบชุดทดลอง ทดสอบ และปรับปรุงชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ให้มีความเสถียรและมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมากที่สุด
8. ทดสอบเก็บผลการศึกษาด้านกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
9. วิเคราะห์ผลทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ได้จากชุดทดลอง
10. วิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการจำลองทางโปรแกรม PSCAD/EMTDC และชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
11. สรุปผลการศึกษาวิจัยเพื่อจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ และเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ทางไฟฟ้า โดยสร้างชุดทดลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีเป้าหมายคือศึกษาคุณลักษณะและผลกระทบของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การท งานวิจัยนี้ท เพื่อออกแบบและสร้างชุดจ าลองการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะต่างๆของระบบ น ไปสู่การปรับใช้ในประเทศเพิ่มลดความสูญเสียในสายส่งและเพิ่มระยะทางในการส่งจ่ายให้ได้ระยะทางไกล เพื่อสร้างความมั่นคงในระบบไฟฟ้าของประเทศ โดยงานวิจัยนี้มีประโยชน์ 2 ด้านหลักๆดังนี้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

1.สามารถลด กำลังสูญเสียในสายส่ง เพราะการส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีพารามิเตอร์ RLC ที่ค่อนข้างต่ำ ๆ ทให้เกิดกรเหนี่ยวน ำให้เกิดความสูญเสียได้น้อยกว่ากระแสสลับ โดยศึกษาจากจ าลองระบบและวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า น ค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าเชิงทฤษฎี

2.สามารถเพิ่มระยะการส่งจ่ายไฟฟ้าให้มีระยะทางไกลขึ้น เพราะการลดก ำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ท ำให้ลดข้อจ ากัดของความยาวสายส่งที่มีผลต่อความสูญเสีย จึงสามารถยืดระยะทางในการส่งจ่ายให้ไกลกว่าเดิมได้

3.ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนไฟฟ้ากับประเทศเพื่อนบ้าน เนื่องจากก าลังการผลิตไฟฟ้าในประเทศ บางช่วงอาจมีไม่เพียงพอต่อการใช้งานในประเทศ ท ำให้เราต้องน ำเข้าไฟฟ้าจากต่างประเทศมาเสริมความมั่นคงทางไฟฟ้า แต่ความถี่ทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน จึงจ ำเป็นต้องแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงก่อนจึงจะสามารถแลกเปลี่ยนกันได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในด้านการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ

1.สามารถออกแบบระบบส่งจ่ายก ำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่เหมาะสม เพื่อน ำไปใช้งานในระบบส่งจ่ายจริง

2.เพื่อเป็นองค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งสามารถต่อยอดน ำไปออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนกระแสตรงต่อไป

3.การวิเคราะห์ที่น ำเสนอในโครงการวิจัยนี้ ได้บทความเชิงวิชาการในระดับนานาชาติจ นวน 1 บทความ นับได้ว่าเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อเรื่องของบทความที่คาดว่าจะตีพิมพ์คือ

- Modelling and Analysis of High Voltage Direct Current Transmission Systems

วารสารวิชาการระดับนานาชาติที่คาดว่าจะน าเสนอ 1 บทความ เช่น

- IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (ISI Impact Factor: 0.329, SCOPUS, SJR Impact Factor 0.218)
- International Journal of Control, Automation and Systems (ISI Impact Factor 0.953, SCOPUS, SJR Impact Factor 0.468)
- Journal of Electrical Engineering and Technology (ISI Impact Factor 0.725, SCOPUS, SJR Impact Factor 0.279)

เป็นต้น



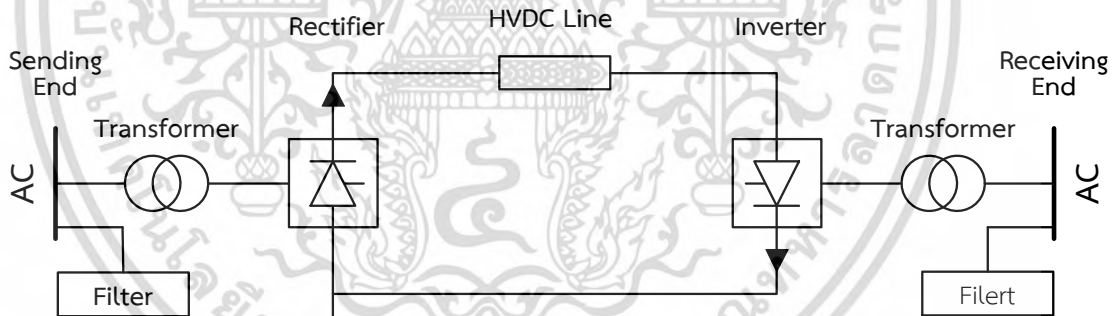
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

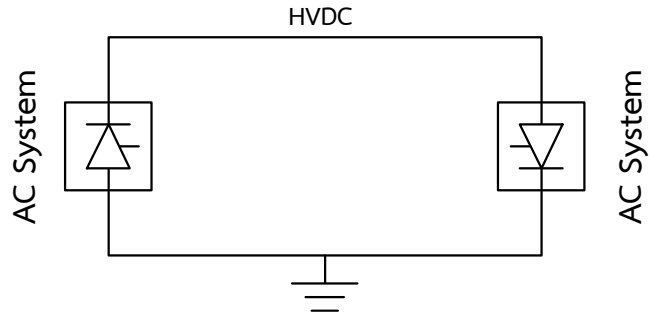
ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Direct Current Transmission Systems : HVDC Transmission Systems) คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง กระแสของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงไหลในทิศทางเดียว ไม่มีความถี่ ข้อดีของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง คือ เมื่อส่งกำลังไฟฟ้าปริมาณมากที่ระยะทางไกลจะเกิดกำลังสูญเสียน้อย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



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วยระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

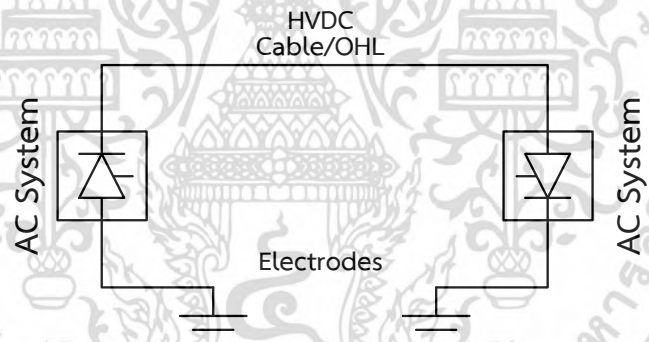
2.2 รูปแบบของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

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

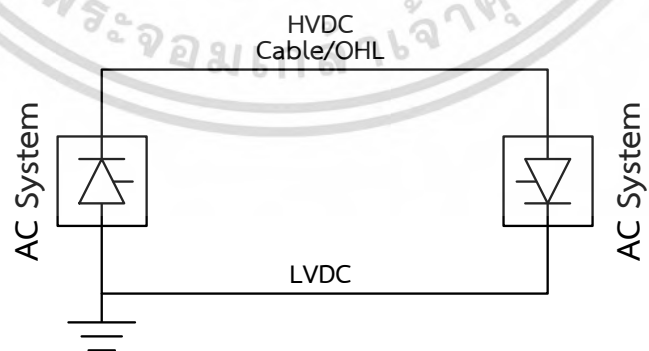


รูปที่ 2.2 คอนเวอร์เตอร์แบบคทูปแบค (Back-to-Back Converter)

การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบขั้วเดียว (Monopolar Long-distance transmissions) ใช้สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระยะไกลมาก ๆ ในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลใต้ทะเลสามารถใช้ทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้า (Return Path) เป็นพื้นดินหรือทะเลได้ดังรูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียวมักจะสร้างไว้ขยายต่อเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว ในหลาย ๆ กรณีอาจมีขีดจำกัดในเรื่องโครงสร้างหรือสภาพแวดล้อม ทำให้ไม่สามารถใช้อิเล็กทรอนิกส์สำหรับทางเดินกลับเป็นพื้นดินหรือทะเลได้ จึงต้องใช้ทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะแทน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดิน

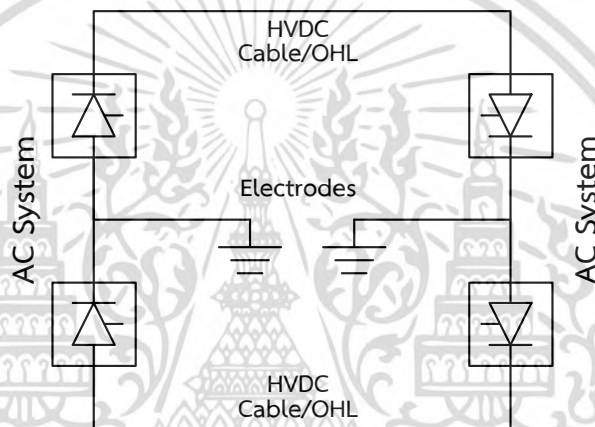


รูปที่ 2.4 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

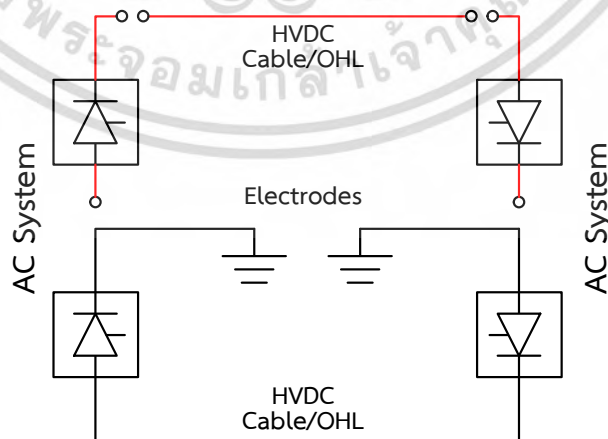
2. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้ว (Bipolar Long-distance Transmissions) คือ การส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้สองขั้วและมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Common Low Voltage Return Path) ร่วมกันในสภาวะการท งานปกติ ทางเดินกลับของก ำลังไฟฟ้ามีกระแสไม่สมดุลแต่มีค่าน้อยไหลอยู่ การส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้วจะใช้เมื่อต้องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก ซึ่งเกินขีดความสามารถของระบบขั้วเดียว ขณะที่มีการซ่อมบ ารุหรือเกิดความผิดพลาดในการท งานที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ขั้วที่เหลือยังสามารถส่งจ่ายก ำลังไฟฟ้าได้ ระบบสองขั้วมี 3 ลักษณะ คือ

3.1. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้วมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นดินหรือทะเล (Bipolar with Ground Return Path) ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้กันโดยทั่วไป สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว การใช้วงจรลักษณะนี้จะมีคามยืดหยุ่นในการท งานสูง ระบบมีความน่าเชื่อถือ



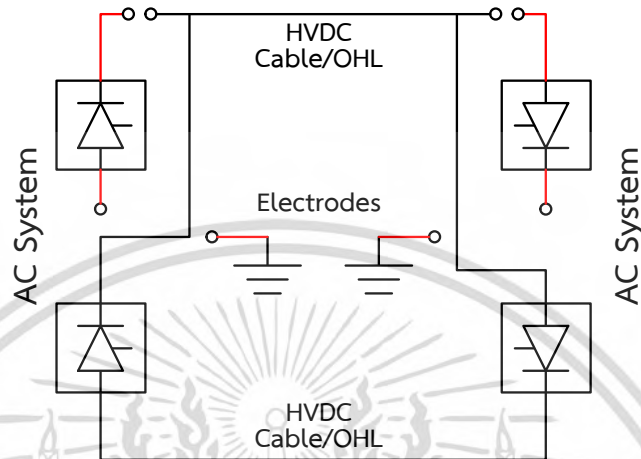
รูปที่ 2.5 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะท งานในสภาวะปกติ

หากขั้วใดขั้วหนึ่งเกิดความผิดพลาดในการท งาน กระแสของขั้วที่ยังท งานปกติจะไหลผ่านทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าที่เป็นพื้นดินหรือทะเลได้ ส่วนขั้วที่เสียหายก็จะถูกแยกออกจากระบบออกไป ดังรูปที่ 2.6



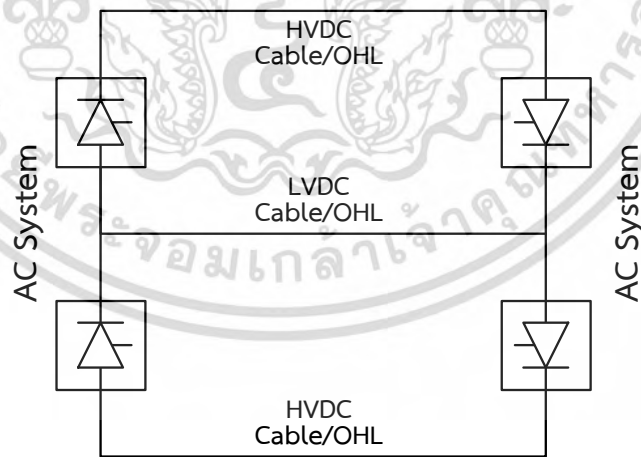
รูปที่ 2.6 ระบบส่งกำลังแบบสองขั้ว (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับขั้วใดขั้วหนึ่ง

สำหรับกรณีที่คอนเวอร์เตอร์เกิดความเสียหายท ให้ไม่สามารถใช้งานขั้วใดขั้วหนึ่ง สามารถให้กระแสของอีกขั้วที่ยังทำงานอยู่ไหลกลับผ่านสายตัวนำของคอนเวอร์เตอร์ที่เสียหายได้ (แทนที่จะไหลกลับทางพื้นดินหรือทะเล) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบส่งกำลังแบบขั้วคู่ (Bipolar) ขณะเกิดความเสียหายกับคอนเวอร์เตอร์

3.2. การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบขั้วคู่ที่มีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าเป็นโลหะและทางงานแบบขั้วเดียว (Bipolar with dedicated metallic ground return path for Monopolar operation) ในกรณีที่มิชข้อจำกัดในการใช้อิเล็กโทรดหรือในกรณีที่ระยะทางในการส่งมีระยะสั้น สามารถใช้สายตัวนำ กระแสตรงแรงดันต่ำ เป็นทางเดินกลับของก ำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.8



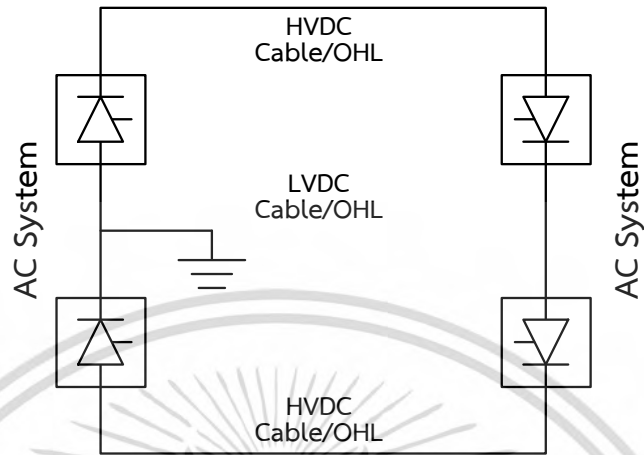
รูปที่ 2.8 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) มีทางเดินกลับเป็นโลหะและท างานแบบขั้วเดียว

การส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลแบบสองขั้วที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับของกำลังไฟฟ้าโดยทางงานแบบขั้วเดียว (Bipolar without dedicated return path for Monopolar operation) การใช้ระบบสองขั้วให้ท างานในลักษณะขั้วเดียว สามารถตัดอิเล็กโทรดหรือทางเดินกลับของก ำลังไฟฟ้าที่เป็นโลหะได้ ซึ่งจะ

ทำให้ต้นทุนเริ่มต้นของระบบนี้มีค่าต่ำที่สุด สามารถให้ระบบสองขั้วทำงานแบบระบบขั้วเดียวได้โดย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สวิตช์บายพาส (Bypass) ขั้วของคอนเวอร์เตอร์ออกไป แต่ไม่สามารถหาได้หากสายตัวนาสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงนั้นมีปัญหา (เพราะใช้เป็นทางเดินกลับของก าลังไฟฟ้า)

3.3.

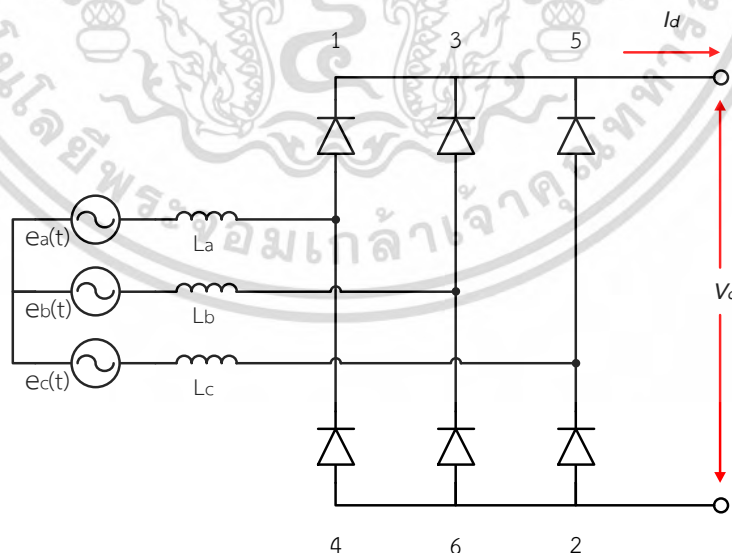


รูปที่ 2.9 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar) ที่ไม่ต้องมีทางเดินกลับและทำงานแบบขั้วเดียว

2.3 คอนเวอร์เตอร์(Converter)

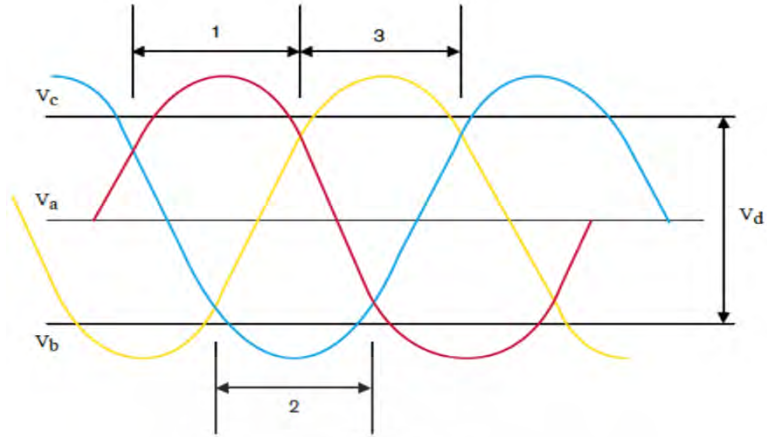
2.3.1 คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด (Six-pulse diode converter bridge)

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) การนำ ำกระแสของไดโอดเป็นไปตามรูปที่ 2.11



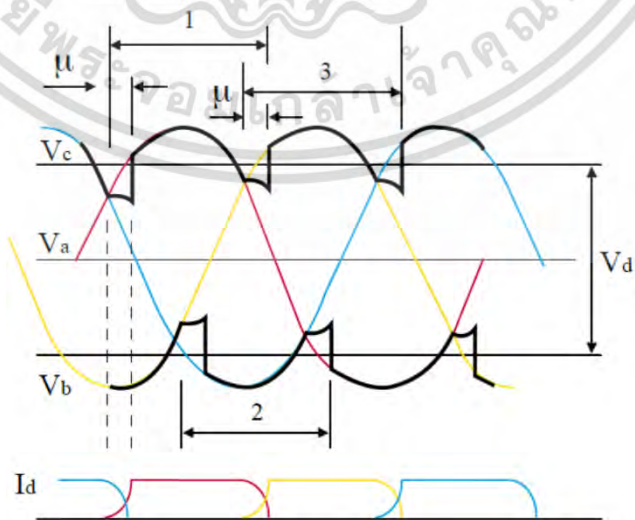
รูปที่ 2.10 คอนเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลำดับการนำกระแสของไดโอด

จากรูปที่ 2.11 สมมติไดโอด 1 และ ไดโอด 2 กำลังทำงานและมีกระแสไหลผ่าน เมื่อเวลาผ่านไปแรงดัน V_{bc} จะมากกว่าแรงดัน V_{ac} ทำให้ไดโอด 3 เริ่มนำกระแส กระแสที่ไหลอยู่จะไหลผ่านไดโอด 3 แทนไดโอด 1 กระบวนการนี้เรียกว่า การคอมมิวเตชัน (Commutation) ในทางปฏิบัติ กระแสที่ไหลไม่สามารถลดลงได้ทันทีเนื่องจากผลของความต้านทานจลนภาพของการคอมมิวเตชัน (ความต้านทานจลนภาพของหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ไทริสเตอร์ หรือวงจรกรองความถี่สูง) ทำให้เกิดการการทางานทับซ้อนหรือโอเวอร์แลป (Overlap) ในขณะนำกระแส เช่น เกิดโอเวอร์แลประหว่างไดโอด 1 กับ ไดโอด 3 รูปที่ 2.12 ซึ่งเห็นว่าแรงดันกระแสตรง (V_d) ลดลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 2.11 ในรูปที่ 2.12 แสดงรูปคลื่นกระแสระหว่างเกิดการคอมมิวเตชัน เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่ไหลผ่านไดโอดกำลังสลับ ขณะเดียวกันไดโอดที่จะทำงานในลำดับถัดไปก็เริ่มนำกระแส ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลอยู่จากไดโอดหนึ่งไปยังอีกไดโอดหนึ่งเรียกว่า มุมโอเวอร์แลป (Overlap angle) หรือ μ



รูปที่ 2.12 การคอมมิวเตชันขณะคอนเวอร์เตอร์ทำงาน

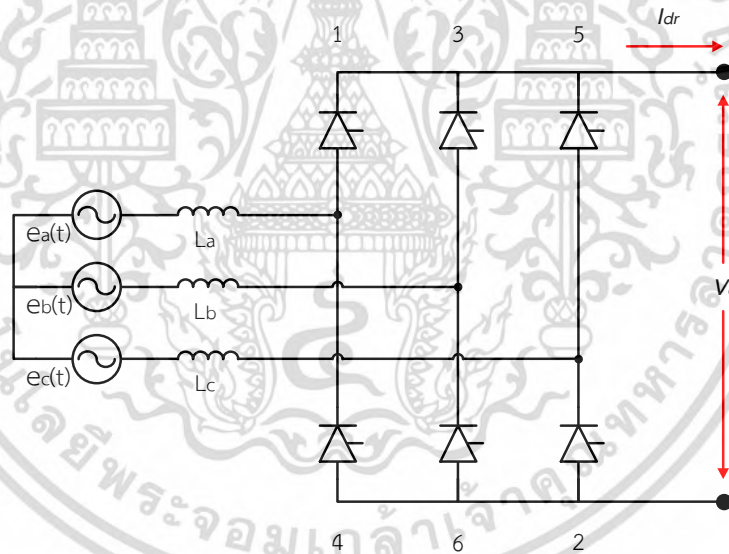
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 คอนเวอร์เตอร์ควบคุมได้ (Controlled Converter)

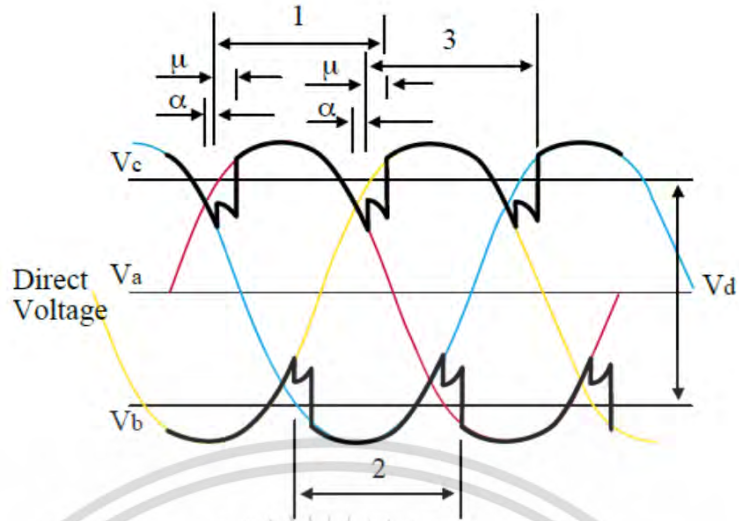
ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับแปลงกระแสไฟฟ้าติดตั้งอยู่ที่ 2 ด้านของสายส่ง ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวคือ คอนเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมีการทำงาน 2 รูปแบบ คือ คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter) หรือ เรกติไฟเออร์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

1. เรกติไฟเออร์ (Rectifier)

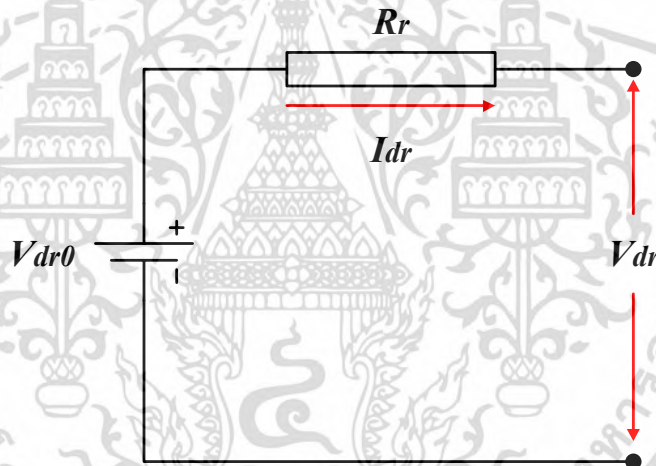
โดยทั่วไปแล้วคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถควบคุมเฟสได้แสดงดังรูป 2.13 ไทริสเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสวิตช์จะไม่ทำงานจนกว่าจะมีสัญญาณมาที่ขาเกต กระบวนการแปลงแรงดันเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติไฟเออร์สามารถหน่วงเวลาได้ด้วยมุมหน่วงนากระแสไฟฟ้าหรือมุมจุดชนวน (Firing angle : α) จากรูปที่ 2.14 มุมจุดชนวนจะเป็นช่วงเวลาที่สวิตช์ถูกไบอัสไปหน้าจนถึงเวลาที่เริ่มการคอมมิวเตชัน



รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์ท งานเป็นเรกติไฟเออร์



รูปที่ 2.14 คอนเวอร์เตอร์ท งานที่มุมจุดชนวน



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของเรกติไฟเออร์

เมื่อ $e_a(t)$ $e_b(t)$ และ $e_c(t)$ เป็นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

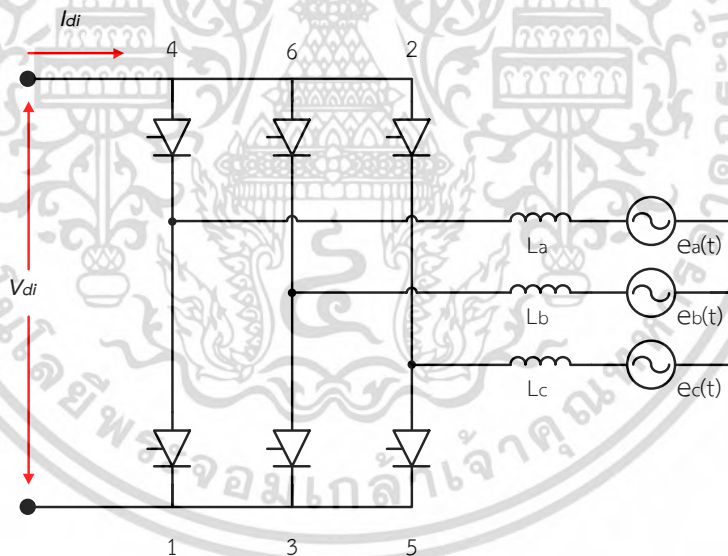
$$R_r = \frac{3}{\pi} x_r \quad (2.2)$$

เมื่อ x_r คือ ความต้านทานจินตภาพคอมมิวเตชันของเรคตีไฟเออร์
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของเรคตีไฟเออร์ คือ

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

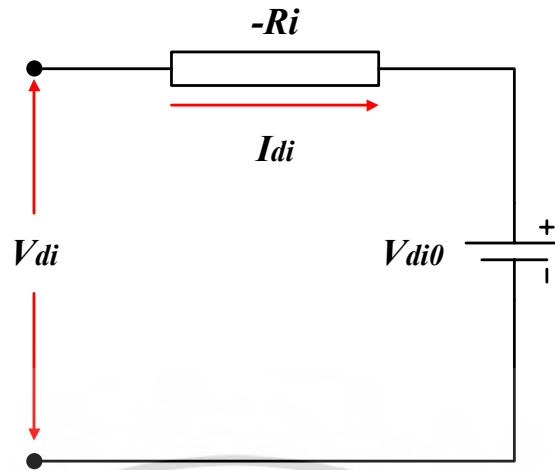
2. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในทานองเดียวกัน คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งมีวงจรและการท างานที่คล้ายกับเรคตีไฟเออร์ดังรูปที่ 2.16 เมื่อเพิ่มมุมจุดชนวนเกิน 90 องศาคอนเวอร์เตอร์จะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ โดยปกติใช้มุมหยุดนากระแสหรือมุมดับชนวน (Extinction angle : γ) กับอินเวอร์เตอร์ วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 คอนเวอร์เตอร์ท างานเป็นอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้ากับมุมดับขนวน คือ

$$V_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ai}(t) \cos \gamma \quad (2.4)$$

เมื่อ $V_{ai}(t)$ คือ แรงดันไลน์ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ และมุมหยุดคน ทาระแส (γ) 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 ความต้านทานจินตภาพคอมมิวเตชั่นของอินเวอร์เตอร์

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวกรองไฟฟ้า

2.4.1 ตัวกรองไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Filter)

หลักการออกแบบตัวกรอง คือ กาจัดกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นและการรบกวนจากสัญญาณรบกวน ตัวกรองที่มีประสิทธิภาพนั้นอิมพีแดนซ์ของตัวกรองต้องมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และในระบบอุดมคตินั้นอิมพีแดนซ์ตัวกรองต้องไม่เกิดการเรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

2.4.2 จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter)

โครงการระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสมัยใหม่นิยมใช้จูนฟิลเตอร์แบบขนาน (Shunt-harmonic) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนา 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 ค่าความต้านทานของความเหนี่ยวนาหรือค่าความต้านทานของความจุไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หรือ

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

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

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

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

เมื่อ	E_{ac}	คือ	ค่ารากก ล้างสองเฉลี่ยของแรงดันไลน์ที่เอชทีบัส (HT Bus)
	I	คือ	อัตราส่วนจ านวนรอบของหม้อแปลง
	B	คือ	จ านวนวงจรบริดจ์ที่ต่ออนุกรมกัน
	P	คือ	ก ำลังไฟฟ้าจริง
	Q	คือ	ก ำลังไฟฟ้าเสมือน
	X_c	คือ	ความต้านทานจินตภาพคอมมิวเตชันต่อวงจรบริดจ์
	V_d, I_d	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสต่อหัว

สมการด้านบนที่ใช้ในการค านวณหาหม้อส่วนประกอบก ำลัง (Power factor angle : ϕ) เป็นการหาค่าโดยประมาณ และส าหรับสมการของสายส่งกระแสตรงสามารถเขียนได้ในรูปของความต้านทาน R_L ได้ตามสมการที่ 2.23

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ระบบเปอร์ยูนิต (Per-Unit System)

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ที่อยู่บนพิกัดต่างกันมา เชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกัน จึงมีการนาระบบเปอร์ยูนิต (Per-Unit System) เข้ามาช่วยเพื่อให้ยู่ บนฐานเดียวกัน คำนวณง่ายขึ้นโดยค่าปริมาณต่างๆสามารถคำนวณให้อยู่ในค่าของเปอร์ยูนิตได้ดังนี้

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

ค่าจริง (Actual value) สามารถเป็นได้ทั้งปริมาณเฟสเซอร์ (Phasor) หรือจำนวนเชิงซ้อน ส่วนค่า ฐาน (Base value) จะเป็นจำนวนจริงเสมอ โดยที่ต้องทราบค่าฐานของปริมาณอย่างน้อยสองค่า เพื่อที่จะหาไปหาค่าฐานที่เหลือได้ โดยค่าฐานของกระแสจะหาได้จากสมการที่ 2.25 และค่าฐานของ แรงดันไฟฟ้าจะหาได้จากสมการที่ 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 โดยกำลังปรากฏและ แรงดันไฟฟ้าในระบบเปอร์ยูนิตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.27 และ สมการที่ 2.28ตามล าดับ

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

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

อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงแต่ละเครื่องนั้นบางครั้งจะอยู่ในระบบเปอร์ยูนิตที่มี ค่าฐานที่พิกัดของตัวเอง จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตของอิมพีแดนซ์จากระบบหนึ่ง ให้อยู่ใน ค่าฐานของอีกระบบหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

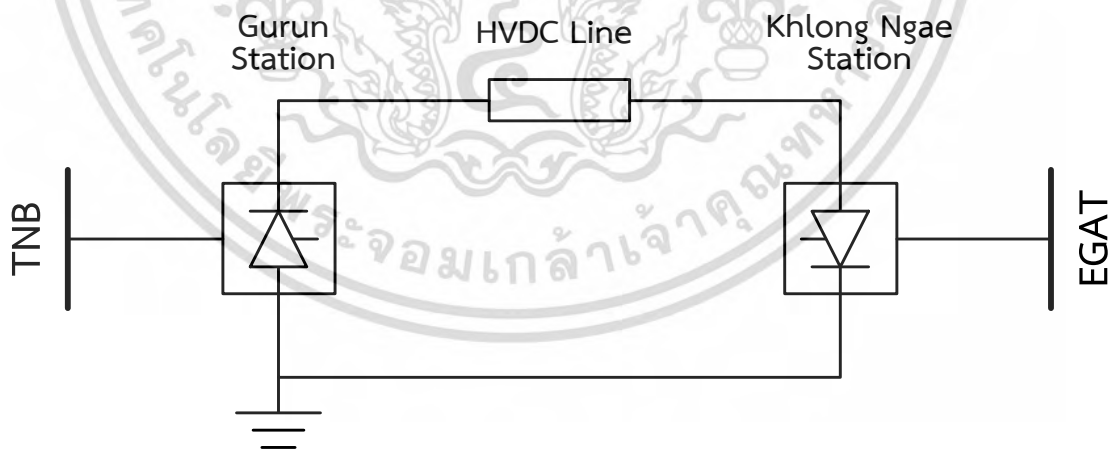
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจริงที่นำมาศึกษาและจำลองเป็นระบบที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้า Gurun ของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย (TNB) และสถานีไฟฟ้าคลองแจะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระบบสายส่งมีพิกัด 300 kV 300 MW สามารถให้โหลดเกินได้ถึง 450 MW ในเวลาไม่เกิน 10 นาที ระยะสายส่ง 110 กิโลเมตร (ประมาณ 24 กิโลเมตรบนพื้นที่ของประเทศไทยและ 86 กิโลเมตรบนพื้นที่ของประเทศมาเลเซีย) โดยส่งกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้า Gurun มายังสถานีไฟฟ้าคลองแจะ ทาการจำลองโดยอ้างอิงจากระบบจริง เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง พิกัดแรงดัน และพิกัดกำลัง และศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ เช่น กาลังสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะทาง พิกัดแรงดัน หรือ กาลังไฟฟ้าที่ส่งจ่าย

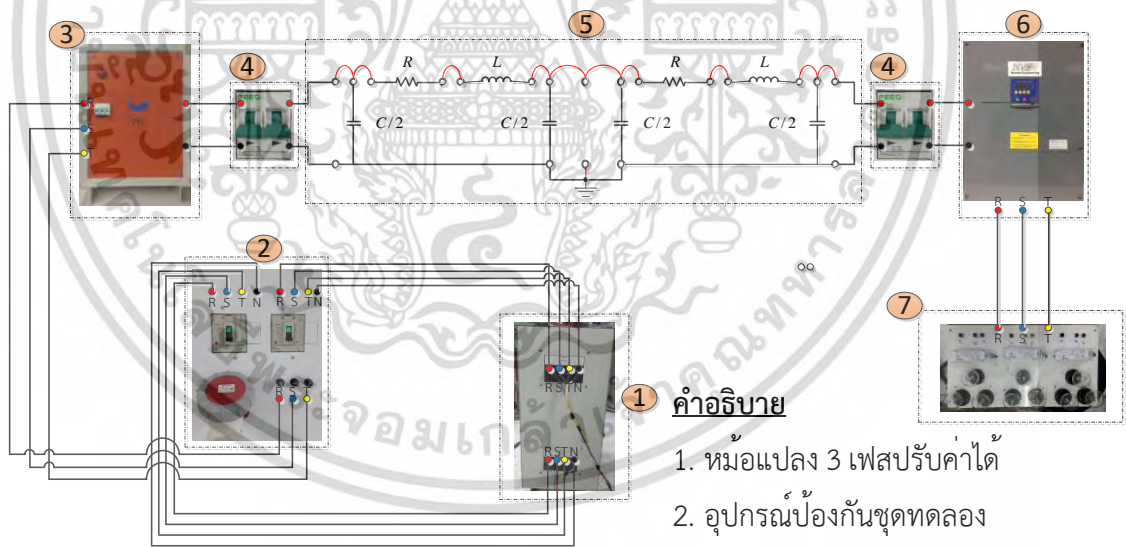
3.1 การออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

โครงสร้างของระบบที่นำมาศึกษาเป็นระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ส่งกำลังไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) มีทางเดินกลับของก ลังไฟฟ้าเป็นโลหะ ภาพรวมของระบบที่ทาการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบจ ลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

แนวคิดการออกแบบเบื้องต้นจากรูปที่ 3.1 ให้ระบบไฟฟ้าก ล้าของการไฟฟ้าแห่งชาติมาเลเซีย เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดทดลองส่งกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงเข้าสู่ สถานีไฟฟ้า Gurun ซึ่งเป็นสถานีแปลงแรงดันในชุดทดลองกำหนดให้เป็นเรกติไฟเออร์ สถานี Gurun จะส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 300 kV 300 MW ในชุดทดลอง กำหนดให้เป็นแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงวงจรมูลพาย (π -Equivalent Circuit) กำลังไฟฟ้าถูกส่งไปสถานีไฟฟ้าคลองแะในชุดทดลองกำหนดให้เป็นอินเวอร์เตอร์ ระบบไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูงที่ถูกแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจะถูกส่งเข้าระบบไฟฟ้าของการ ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งในระบบจำลองกำหนดให้เป็นโหลด ระบบจำลองที่ออกแบบแสดง ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนส ัตยต่าง ๆ โดยเริ่มจากจ่ายไฟฟ้าเข้ามาที่หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่า ได้ (หมายเลข 1) เพื่อใช้ในการเพิ่มและลดแรงดันไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อ แปลงที่จ่ายเข้ามาสู่ชุดทดลองนั้นมีอุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง (หมายเลข 2) อยู่ก่อนเข้าสู่เรกติไฟเออร์ 3 เฟส (หมายเลข 3) เพื่อแปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ จ าลองสายส่ง (หมายเลข 5) โดยทั้งต้นทางและปลายทางของระบบจ าลองสายนั้นมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ แบบป้องกันไฟฟ้ากระแสตรง (หมายเลข 4) ป้องกันคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 เครื่องอยู่ จากนั้นที่ปลายสาย ส่งต้องการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนจ่ายไฟให้โหลด (หมายเลข 7) โดยใช้ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (หมายเลข 6)



1 คำอธิบาย

1. หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้
2. อุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง
3. เรกติไฟเออร์ 3 เฟส
4. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกันไฟฟ้ากระแสตรง
5. ระบบจ าลองสายส่ง
6. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
7. โหลด

รูปที่ 3.2 แผนภาพรวมการต่อวงจรของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ

งานวิจัยนี้ทดลองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 V นามาเชื่อมต่อกับหม้อแปลงปรับค่าได้ 3 เฟส เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เรกติไฟเออร์ได้ตามความต้องการ



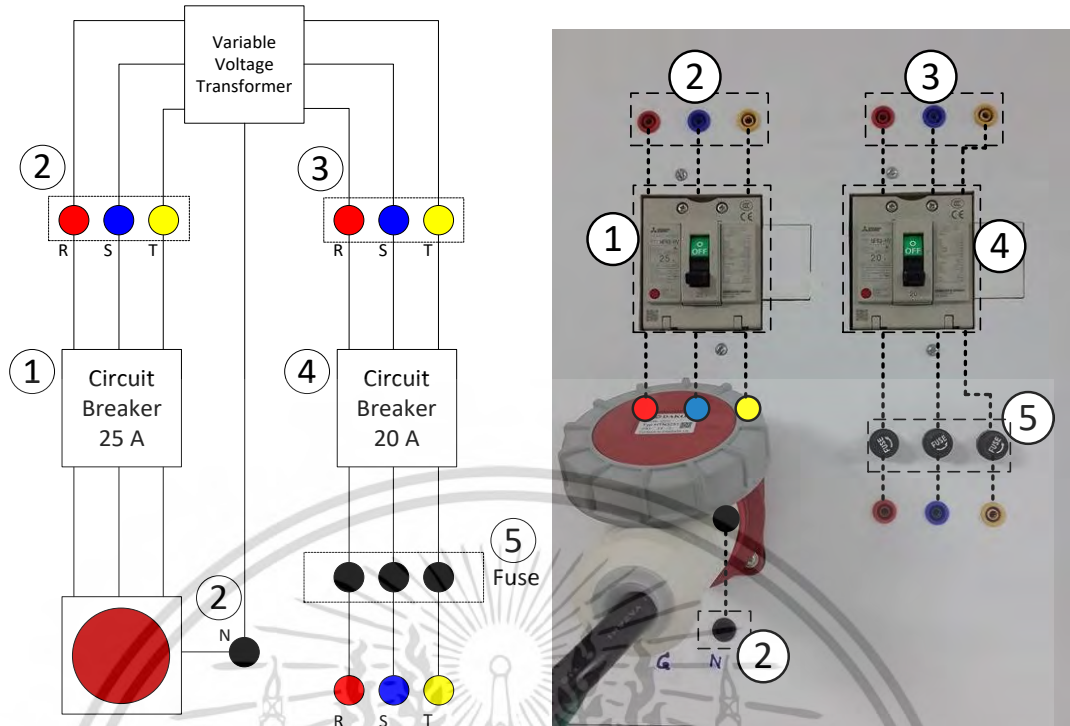
รูปที่ 3.3 หม้อแปลงสามเฟสปรับค่าได้พิกัด 30A 0 - 420Vac

3.1.2 อุปกรณ์ป้องกันชุดทดลอง

ในชุดทดลองของงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ป้องกัน 2 ชนิด คือ เซอร์คิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ โดยใช้เซอร์คิตเบรกเกอร์ในการป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลอง หากเกิดความผิดพลาดขึ้น เซอร์คิตเบรกเกอร์จะตัดวงจรเพื่อป้องกันกระแสเกินที่อาจทำให้ชุดทดลองเสียหาย และจะใช้ฟิวส์ในการป้องกันกระแสเกิน หากขณะทดลองมีกระแสเข้าสู่ระบบมากเกินไปจนอาจทำให้อุปกรณ์เสียหาย ฟิวส์จะทำการป้องกันวงจรโดยหลอมละลาย และปลดวงจรนั้นออกจากระบบจนกว่าจะเปลี่ยนฟิวส์ที่ขาดออกแล้วนำตัวใหม่ใส่เข้าไปแทนที่ การเลือกขนาดฟิวส์นั้นอาจจะสามารถเปลี่ยนได้ตามลักษณะการทดลองหากโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การป้องกันใช้เซอร์คิตเบรกเกอร์ ตามรูปที่ 3.4 หมายเลข 1 ทาหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดในการทดลองที่อาจเกิดขึ้นในชุดทดลองโดยเบรกเกอร์ตัวนี้ติดตั้งระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสปรับค่าได้ตามปรุณภูมิ (หมายเลข 2) ส่วนเซอร์คิตเบรกเกอร์ (หมายเลข 4) และฟิวส์ (หมายเลขที่ 5) จะทาหน้าที่ป้องกันความผิดพลาดที่เกิดถัดจากหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสปรับค่าได้ตามทุติยภูมิ (หมายเลขที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันชุดทดลอง

3.1.3 คอนเวอร์เตอร์

สถานีไฟฟ้า Gurun ทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงของประเทศมาเลเซียให้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อส่งเข้าสายส่ง ในชุดทดลองจึงกำหนดให้สถานีไฟฟ้า Gurun เป็นเรกติไฟเออร์ 3 เฟส ส่วนสถานีไฟฟ้าคลองแงะทำหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่รับมาจากสายส่งให้เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจ่ายเข้าระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงในประเทศไทย ในชุดทดลองจึงกำหนดให้สถานีไฟฟ้าคลองแงะเป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



(ก) เรกติไฟเออร์ 3 เฟส



(ข) รีโมทควบคุมเรกติไฟเออร์



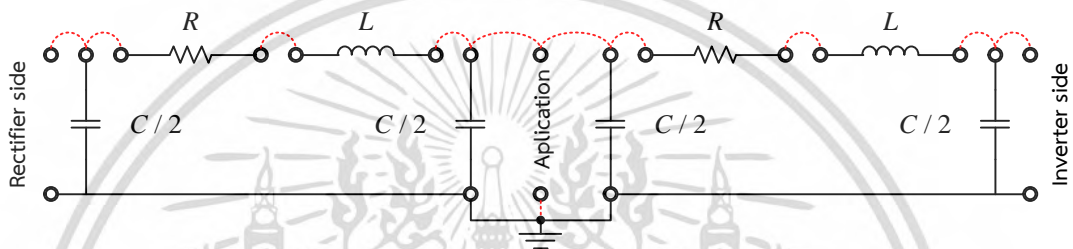
(ค) อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

รูปที่ 3.5 คอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดัน

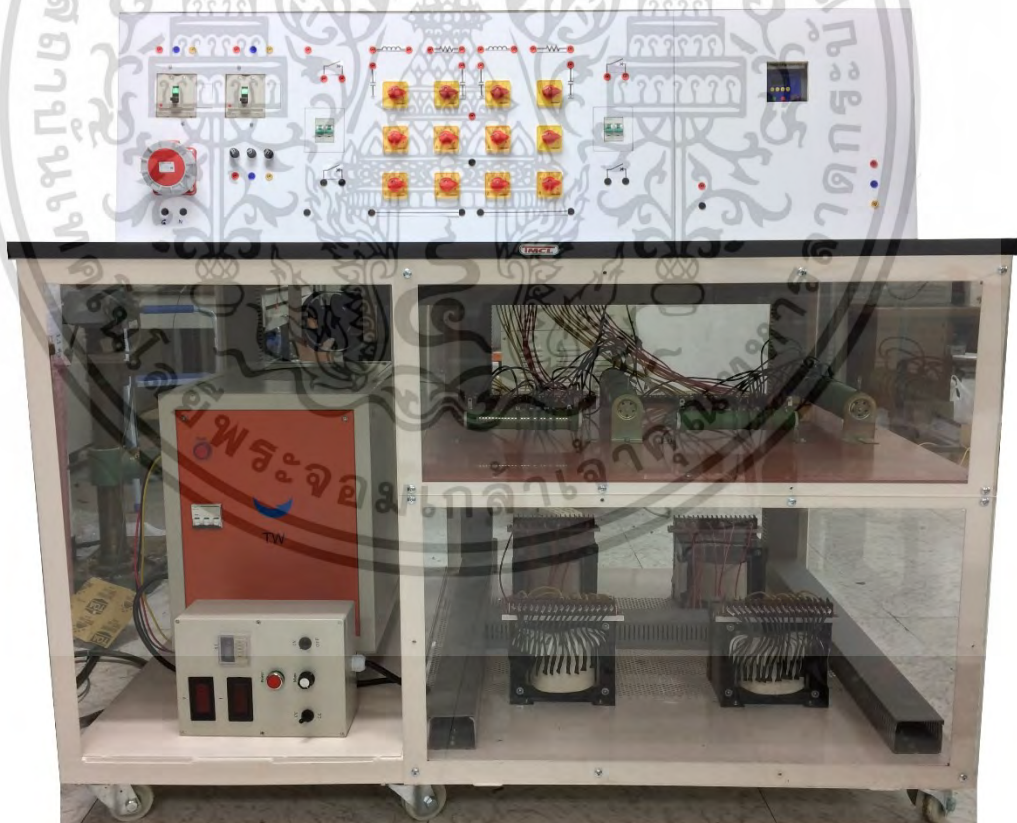
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 แบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

งานวิจัยนี้ทำการจำลองสายส่งของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 150 - 600 กิโลเมตร โดยใช้วงจรสมมูลพาย 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

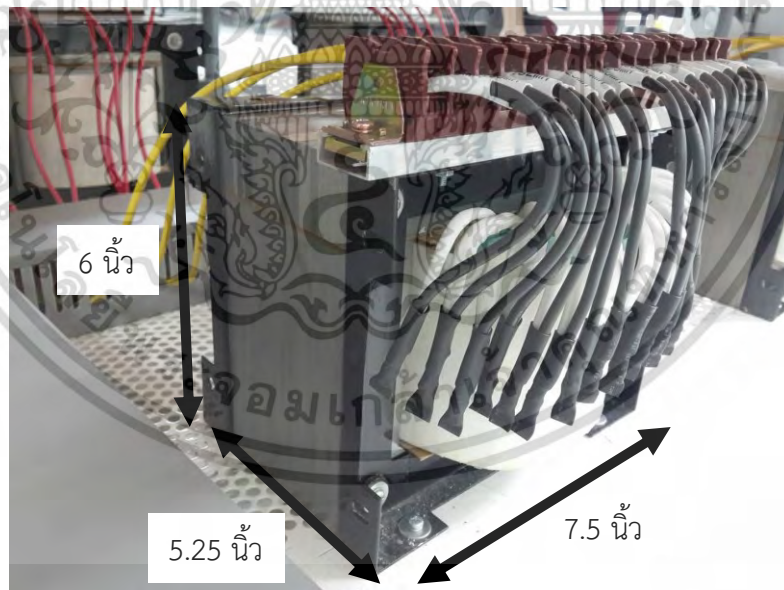
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ด้านหลังชุดทดลองระบบสายส่ง

3.1.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองใช้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ 4 ตัว ใช้ในวงจรสมมูลพายวงจระละ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทุกตัวมีขนาดสูงสุด 205 mH มีพิกัดกระแส 12 A ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เลือกใช้แบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ตามแท็บ

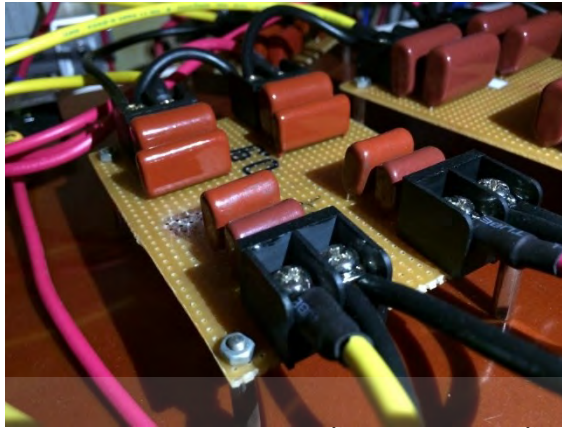
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาว สายส่ง (km)	ความยาวสาย ส่งที่วัดจาก ด้านส่ง (%)	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

3.1.6 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองนี้ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลเวอร์ไมก้า (Silver Mica) ซึ่งผลิตออกมาหลายค่าความจุไฟฟ้าและมีพิสัยแรงดันสูง นำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามต้องการ ค่าความจุไฟฟ้าที่เลือกใช้แบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.10 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดซิลิเวอร์ไมก้า

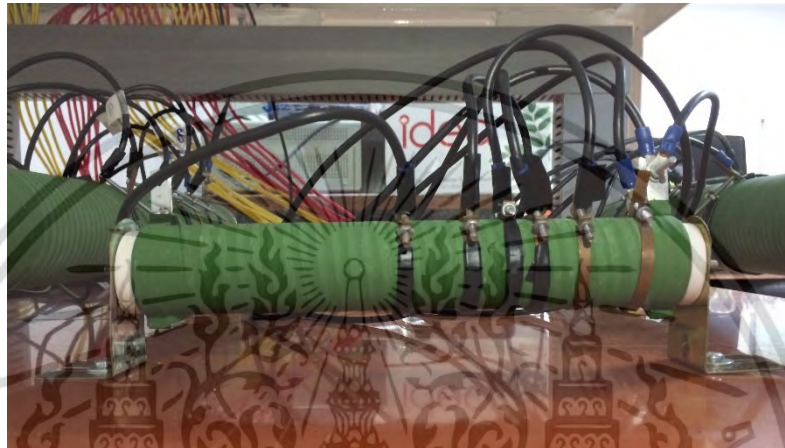
ตารางที่ 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาว สายส่ง (km)	ความยาวสาย ส่งที่วัดจาก ด้านส่ง (%)	ความจุไฟฟ้า (μF)		
			คำนวณ	ใช้ในระบบ จำลอง	ใช้ในระบบ จริง
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 การออกแบบตัวต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบจำลองสายส่งของชุดทดลองนี้ใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์ววด์ (Wire Wound) แบบปรับค่าได้ โดยมีตัวต้านทาน 1 Ω จำนวน 2 ตัว พิกัดกำลังตัวละ 200 W และตัวต้านทาน 10 Ω จำนวน 2 ตัว พิกัดกำลังตัวละ 1000 W ใช้ในวงจรสมมูลพายวงจรละ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เลือกใช้ในระบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 (การคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.11 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์ววด์พิกัดกำลัง 200 W



รูปที่ 3.12 ตัวต้านทานไฟฟ้าชนิดไวร์ววด์พิกัดกำลัง 1000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

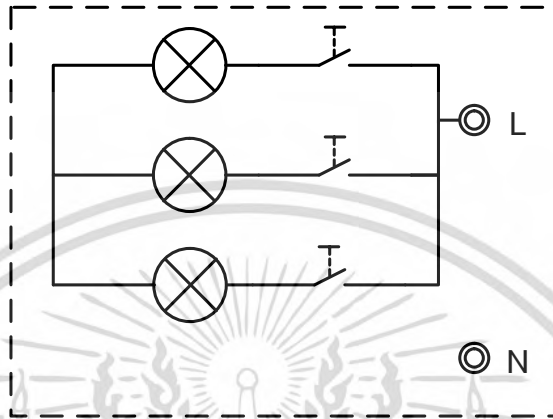
ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแบบจำลองสายส่งที่ระยะต่าง ๆ

ค่าแรงดันฐาน (V)	ความยาว สายส่ง (km)	ความยาวสาย ส่งที่วัดจาก ด้านส่ง (%)	ความต้านทาน (Ω)		
			คำนวณ	ใช้ในระบบ จำลอง	ใช้ในระบบ จริง
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

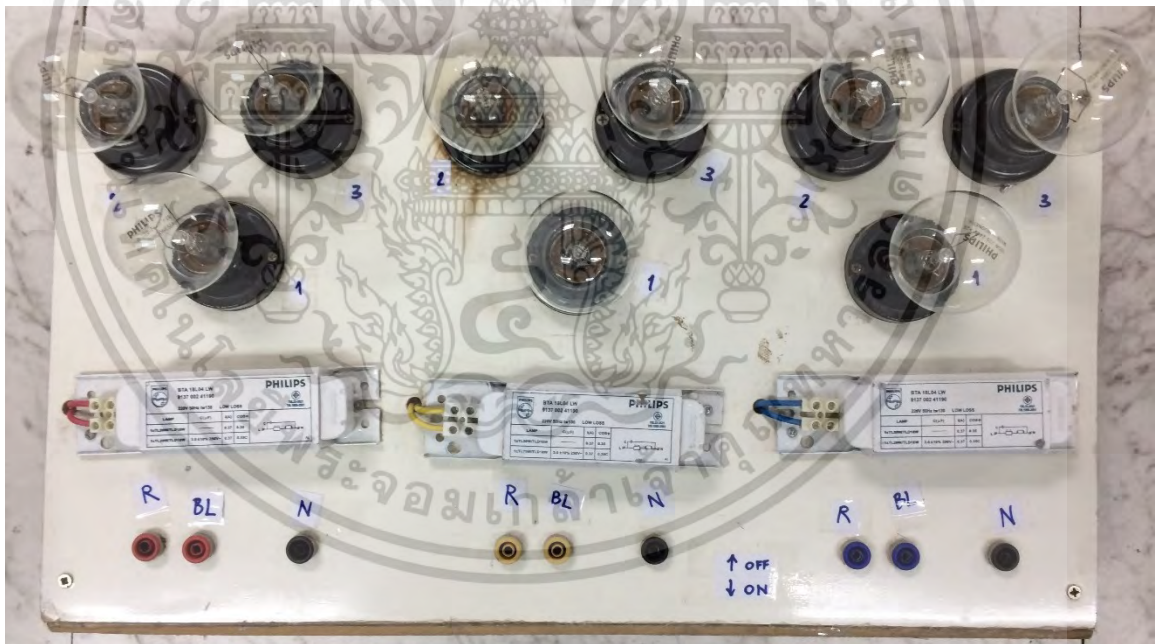
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.8 โหลดของระบบ

สถานีไฟฟ้าคลองแวงรับกำลังไฟฟ้าจากสถานี Guron จึงกำหนดให้ระบบไฟฟ้ากำลัง กระแสสลับแรงดันสูงที่รับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าคลองแวงเปรียบเสมือนโหลดของระบบจาคลอง โหลดที่ใช้ทดลอง คือ โหลดตัวต้านทานใช้หลอดไส้ 250 W ต่อเฟส ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรของโหลดแต่ละเฟสที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.14 โหลดของชุดทดลองระบบสายส่ง

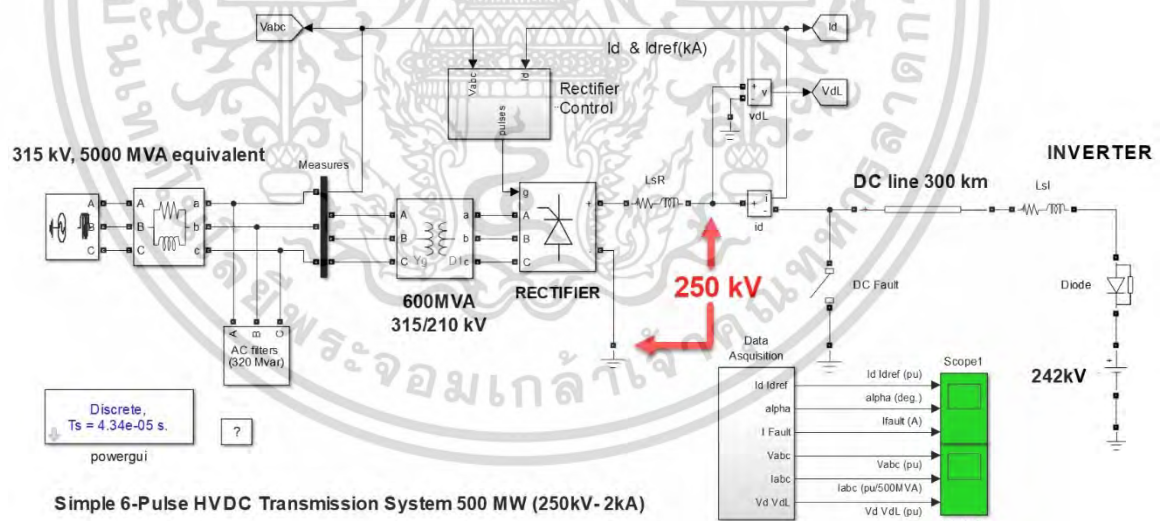
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก่อนประกอบสร้างชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จำเป็นต้องจำลองระบบที่ออกแบบผ่านโปรแกรมจำลองมาก่อน นาผลการจำลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับมาตรฐานหรืองานวิจัยอ้างอิงอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่ออกแบบและยืนยันความน่าเชื่อถือ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ จำลองเพื่อตรวจสอบว่าระบบจำลองที่ออกแบบเชื่อถือได้ และจำลองระบบที่ออกแบบสำหรับหารสร้างชุดทดลอง

3.2.1 การจำลองระบบตัวอย่างระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW

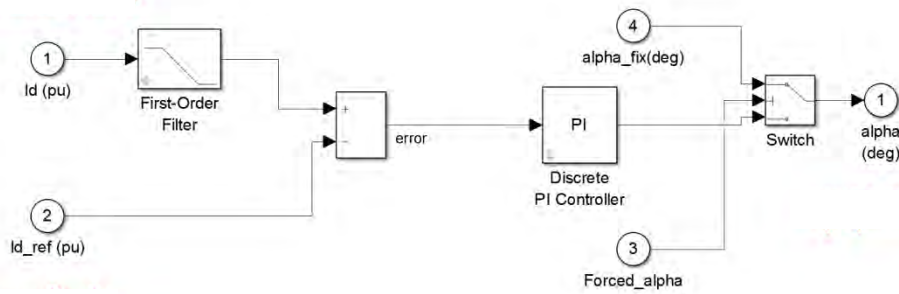
ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสายส่งที่ออกแบบโดยนาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบมาจำลองผ่านระบบตัวอย่างระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW) เป็นตัวอย่างการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 250 kV 500 MW ที่มีโปรแกรม MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.15 โดยเรคตีไฟเออร์ใช้ไทรสเตอร์เป็น อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งและใช้ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ (Current Regulator PI) ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นระบบย่อย (Subsystem) อยู่ภายในระบบควบคุมเรคตีไฟเออร์ (Rectifier Control) ทาหน้าที่ควบคุมมุมจุดชนวน (Alpha) เพื่อให้กระแสในสายส่งมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 3.15 ระบบจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง

Simple 6-Pulse 500 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมภายในระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีไอ

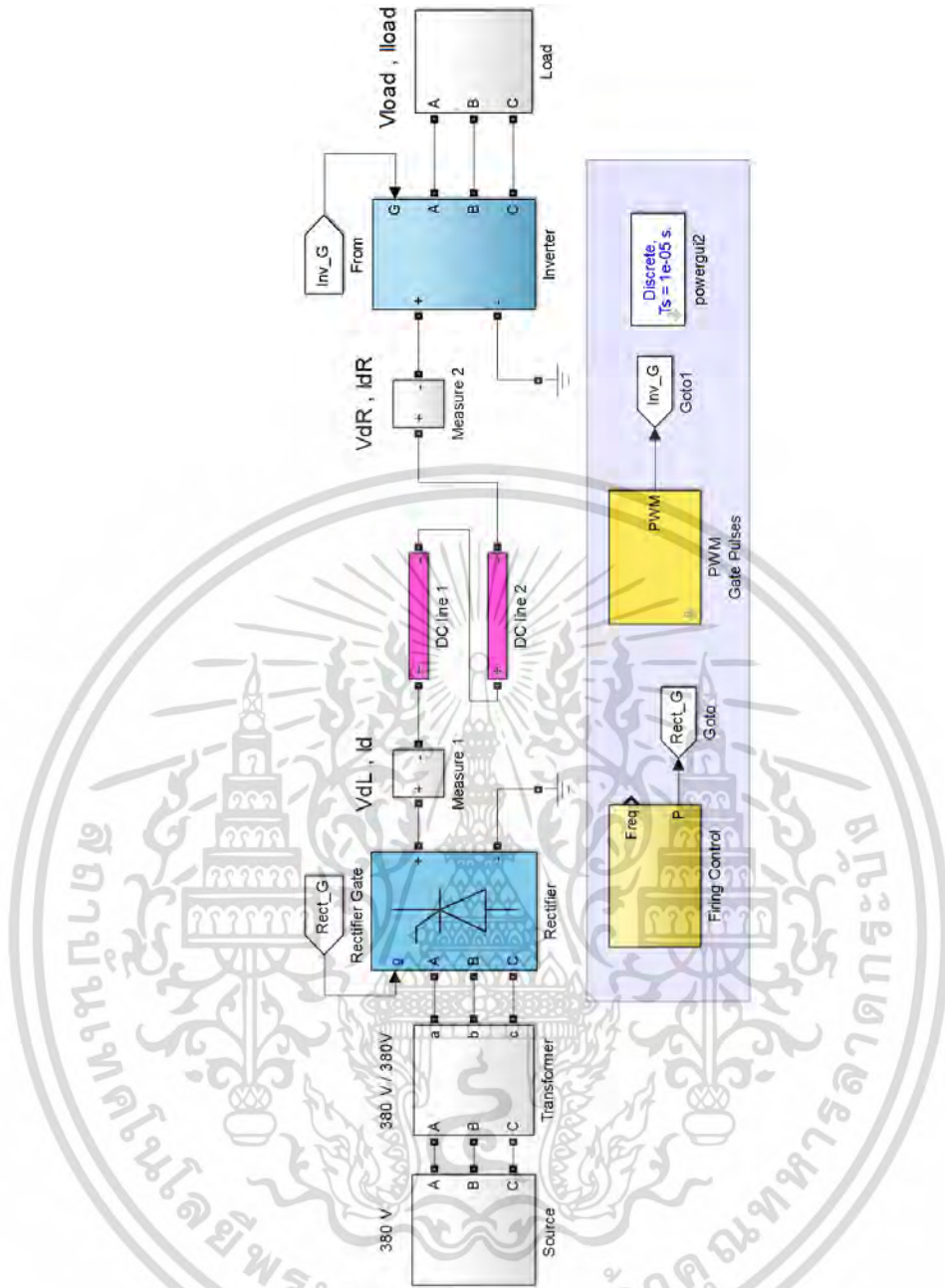
นาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบไว้จำลองผ่านระบบตัวอย่างโดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองของระบบที่ออกแบบกับระบบตัวอย่าง โดยสังเกตจากพฤติกรรมของแรงดันที่ต้นทางสายส่ง กระแสในสายส่ง และมุมจุดชนวน

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 (Ω /km)	0.0150	0.0135	0.0167
ความเหนี่ยวน สายส่ง (mH/km)	0.7920	0.7128	0.8800
ความจุไฟฟ้าสายส่ง (nF/km)	14.40	16.00	12.96
แรงดันโคงข่ายกระแสสลับ (kV)	210	0.380	0.380
แรงดันวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ (kV)	242	0.437	0.484

3.2.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
 ขั้นตอนนี้เป็นกรนาระบบที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1 โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 3.4 มาสร้างเป็นระบบจำลอง 2 ระบบ คือ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 450 V 750 W และ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 500 V 750 W มีส่วนประกอบหลักของระบบได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เรกติไฟเออร์ สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ และโหลด ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ หากการสร้างเป็นระบบย่อย (Subsystem) เพื่อความสะดวกต่อการสร้างและการแก้ไขแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.17 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

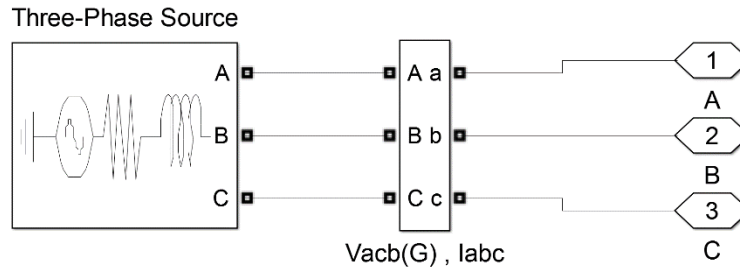
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



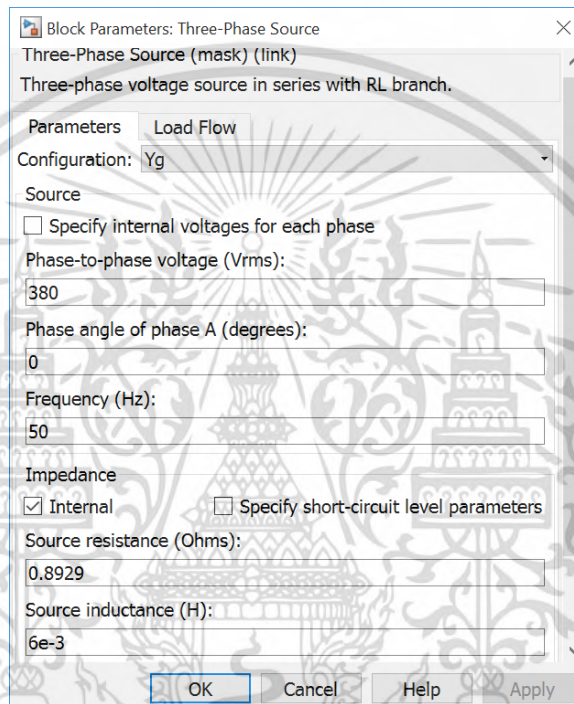
รูปที่ 3.17 แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



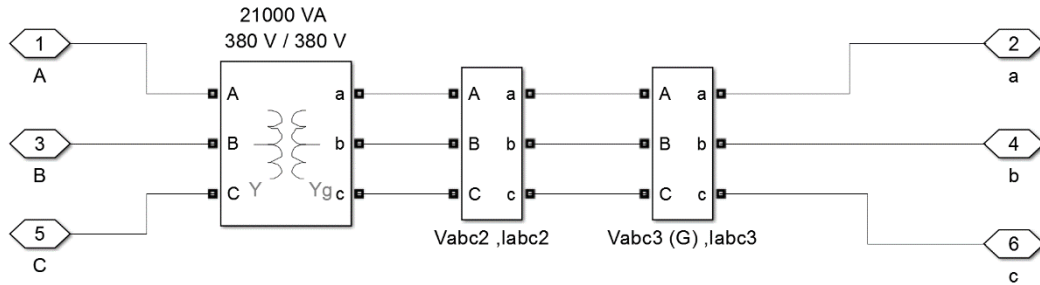
รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของแหล่งจ่าย



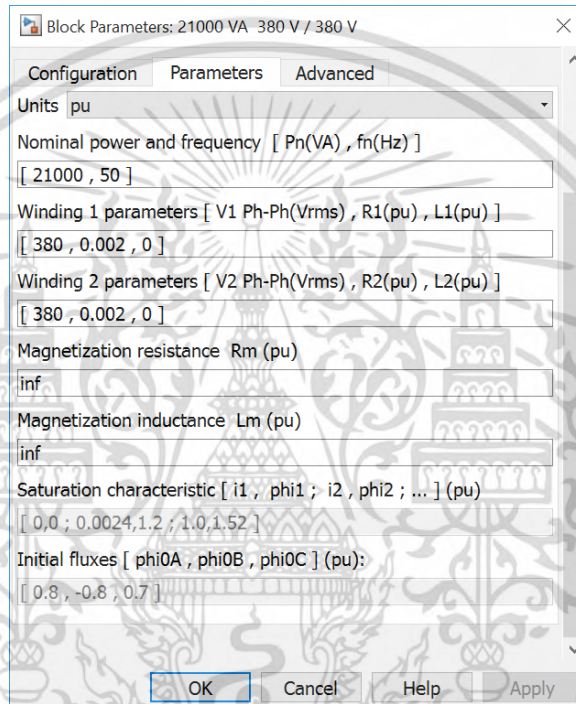
รูปที่ 3.19 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



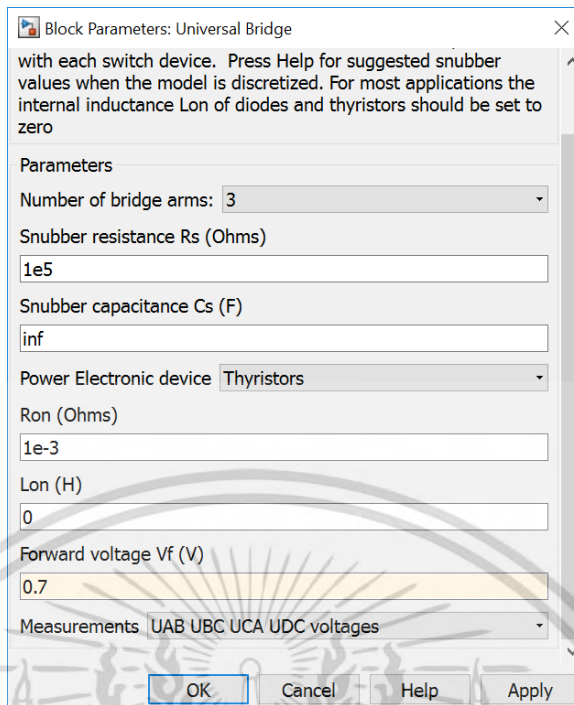
รูปที่ 3.20 ไดอะแกรมภายในของระบบย่อยของหม้อแปลง



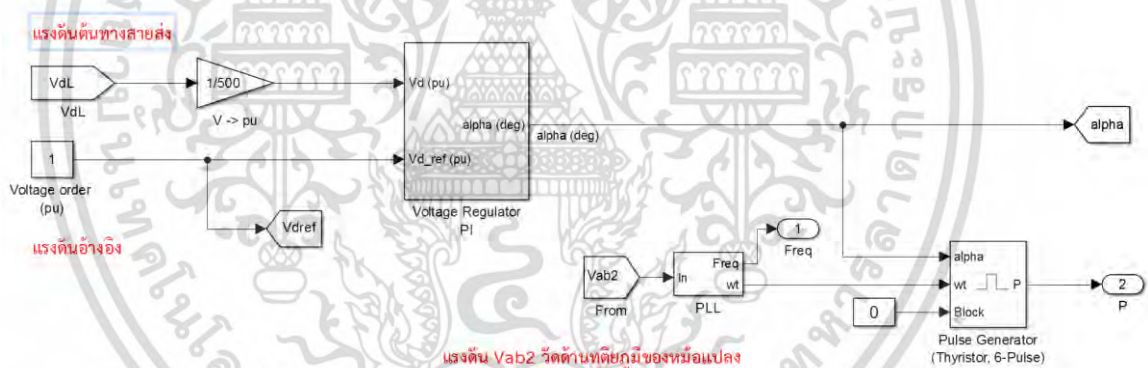
รูปที่ 3.21 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด

เรคตีไฟเออร์ของระบบจะ าสงใช้เครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์ (Universal Bridge) แสดงรายละเอียดการตั้งค่าดังรูปที่ 3.22 ควบคุมการทำงานด้วยระบบย่อยของตัวควบคุมมุมจุดชนวน (Firing Controller) ไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.23 ประกอบไปด้วย ระบบย่อยควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบพีไอ (Voltage Regulator PI) ใช้ระบบควบคุมชนิดพีไอ (PI) ควบคุมมุมจุดชนวนที่ทำให้แรงดันต้นทางของสายส่ง (Vd) มีค่าตามแรงดันอ้างอิงที่กำหนด (Vd_ref) และเครื่องมือเครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) ซึ่งใช้ไทรสเตอร์แบบ 6 พัลส์ ทาหน้าที่สร้างสัญญาณขับเคลื่อนตามมุมจุดชนวนที่ป้อนเข้า โดยใช้เครื่องมือเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop, PLL) ในการสร้างสัญญาณ ωt ของแรงดันไลน์อ้างอิงที่วัดจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อป้อนเข้าเครื่อง กานิดพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



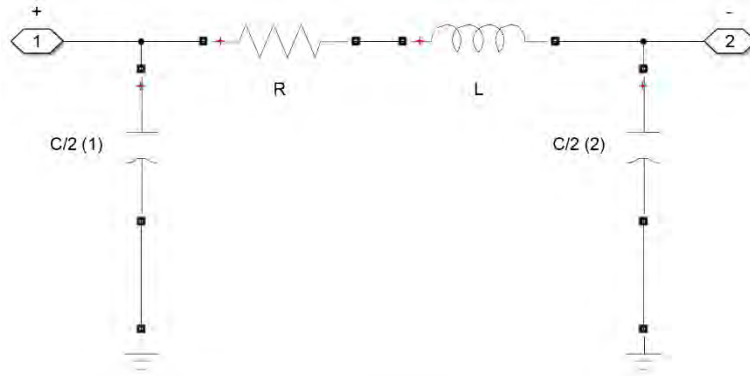
รูปที่ 3.22 รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือยูนิเวอร์แซลบริดจ์สำหรับครกติไฟเออร์



รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมมุมจุดชนวน

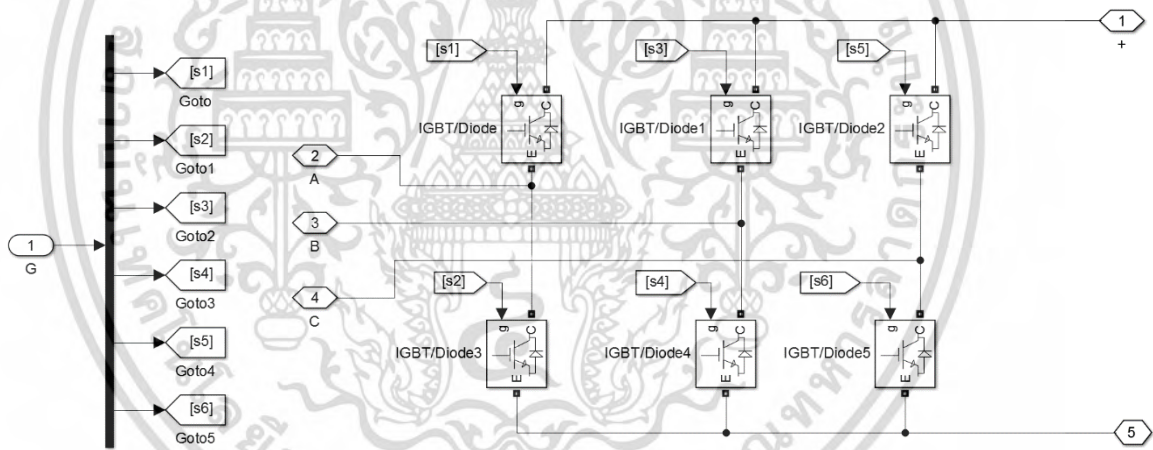
สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงของระบบจำลองใช้ระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง (DC line) โดยไดอะแกรมภายในระบบย่อยแสดงดังรูป 3.24 ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนา และตัวเก็บประจุต่อเป็นวงจรสมมูลพาย โดยกำหนดความต้านทาน ความเหนี่ยวนา และความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่งดังตารางที่ 3.4 จาองระบบที่มีความยาว 150 300 และ 600 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



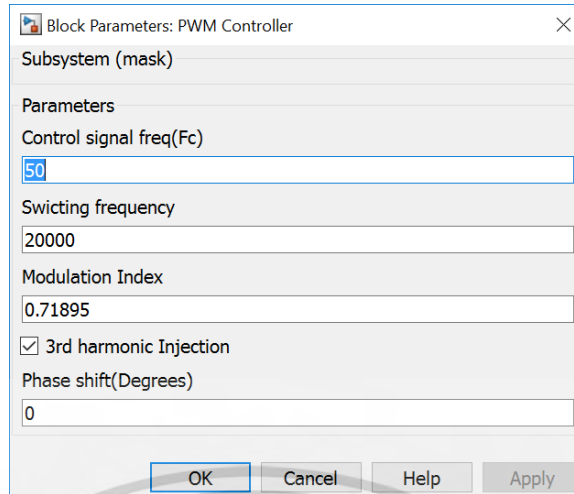
รูปที่ 3.24 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของสายส่งกระแสตรง

อินเวอร์เตอร์ของระบบจ่ายไฟใช้ระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.25 ประกอบไปด้วยไอจีบีทีที่ต่อกันเป็นวงจรถับสัญญาณควบคุมมาจากระบบย่อยของตัวควบคุมพีดีบีเลียม (PWM Controller) รายละเอียดการตั้งค่าแสดงดังรูปที่ 3.26 โดยกำหนดดัชนีการมอดูเลชัน (Modulation index) เพื่อให้แรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 220 V



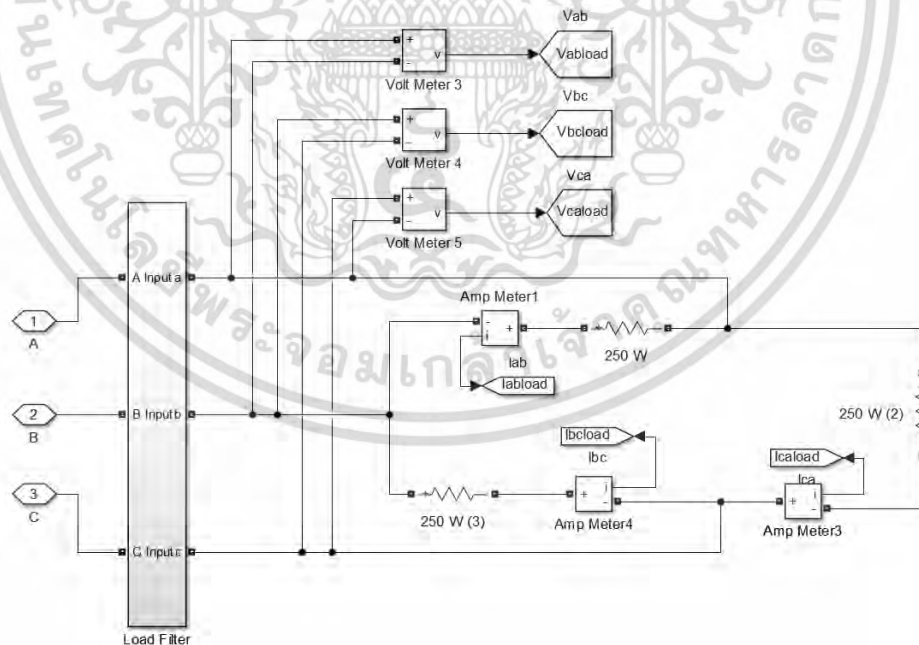
รูปที่ 3.25 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



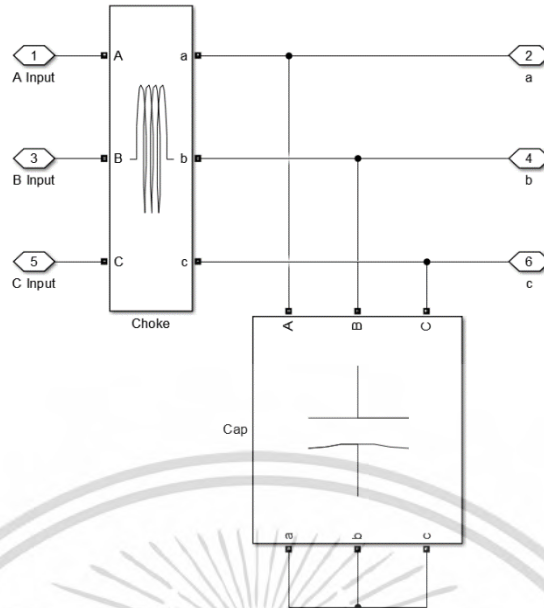
รูปที่ 3.26 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวควบคุมพีดีบีเบิลยูเอ็ม

โหลดของระบบจำลองแทนด้วยระบบย่อยของโหลดโดยไดอะแกรมภายในแสดงดังรูปที่ 3.27 ประกอบไปด้วยตัวกรองไฟฟ้าและโหลด ใช้เครื่องมือโหลดอาร์แอลซีแบบอนุกรม (Series RLC Load) เลือกใช้เป็นโหลดตัวต้านทานต่อแบบเคลด้า และไดอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของโหลด (Load Filter) ใช้ตัวเหนี่ยวนาขนาด 3.5 mH และตัวเก็บประจุขนาด 2 μ F แสดงดังรูป 3.28



รูปที่ 3.27 ไดอะแกรมภายในระบบย่อยของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



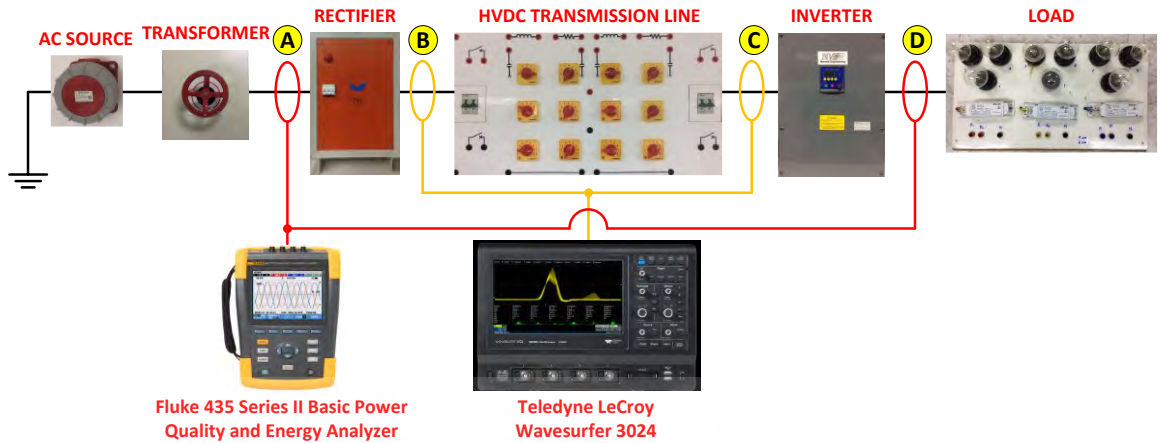
รูปที่ 3.28 ไตอะแกรมภายในระบบย่อยของตัวกรองไฟฟ้าของโหลด

3.3 การทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

การทดลองใช้ไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้ เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เรกติไฟเออร์ 3 เฟส เอาต์พุตของเรกติไฟเออร์เชื่อมกับต้นทางของระบบจำลองสายส่งที่ได้ออกแบบไว้ ปลายทางของระบบจำลองสายส่งต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ในการทดลองทำการปรับค่าพารามิเตอร์สายส่งเพื่อจ สอนความยาวของสายส่งตั้งแต่ระยะ 150 – 600 กิโลเมตร ทาการศึกษา ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 3 กรณี ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของสายส่งที่ ความยาวสายระยะต่าง ๆ ขณะจ่ายโหลด และการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อ เปลี่ยนชนิดของโหลด

1. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนความยาวของสายส่ง ทดลองที่ความยาว 150 300 และ 600 กิโลเมตร โดยพิกัดแรงดันของสายส่งและโหลดคงที่ บันทึกค่ากระแส ก กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง
2. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันของสายส่ง ทดลองที่พิกัดแรงดัน 450 V และ 500 V โดยความยาวสายส่งและโหลดคงที่ บันทึกค่ากระแส ก กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง
3. การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนชนิดของโหลด ทดลองใช้ โหลดต่างชนิดกัน ได้แก่ โหลด 300 W 750 W และ 1500 W โดยพิกัดแรงดันและความยาวของสายส่งคงที่ บันทึกค่ากระแส ก กำลังสูญเสีย และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ไดอะแกรมเส้นเดียวของการทดลองโดยใช้ระบบไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ

การบันทึกผลการทดลองนั้นแสดงตำแหน่งวัดค่าดังรูปที่ 3.29 โดยวัดปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยจำลองระบบสายส่งเป็นวงจรสมมูลพาย (π) 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 โดยเรกติไฟเออร์ใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์และอินเวอร์เตอร์แทนด้วยวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์

4.1.1 ระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW

ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.1 พฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ จะถูกกำหนดด้วยวงจรถอบคุมของระบบตัวอย่าง 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° ดังรูปที่ 4.1 (ค)

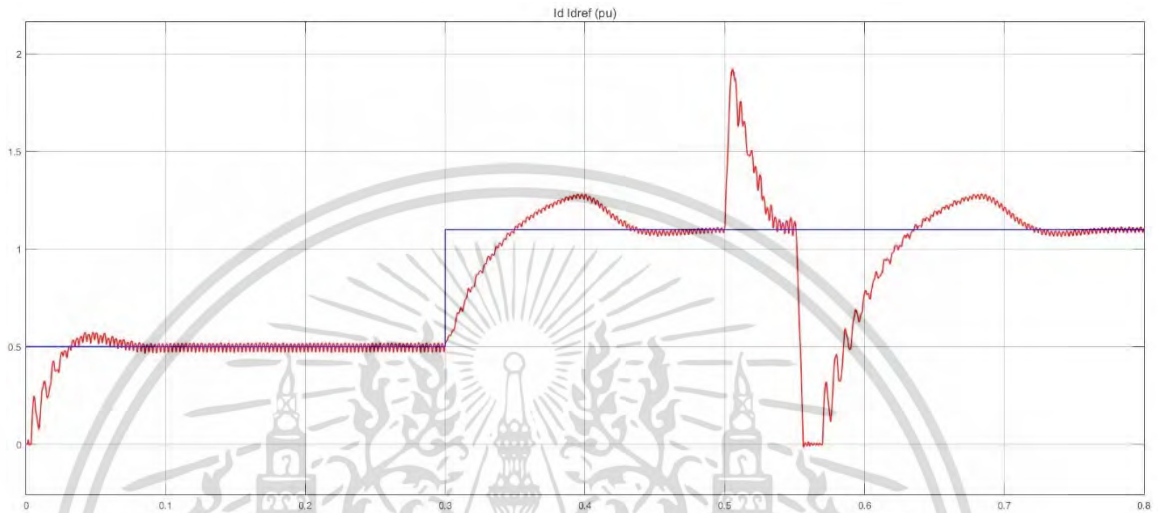
ช่วงเวลาจาก 0.3 ถึง 0.5 วินาที จากรูปที่ 4.1 (ก) ที่เวลา 0.3 วินาที กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าให้เพิ่มขึ้น 0.6 pu การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงใช้เวลาประมาณ 0.13 วินาทีจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมุมจุดชนวนลดลงจาก 60° เป็น 45° ดังรูปที่ 4.1 (ค)

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

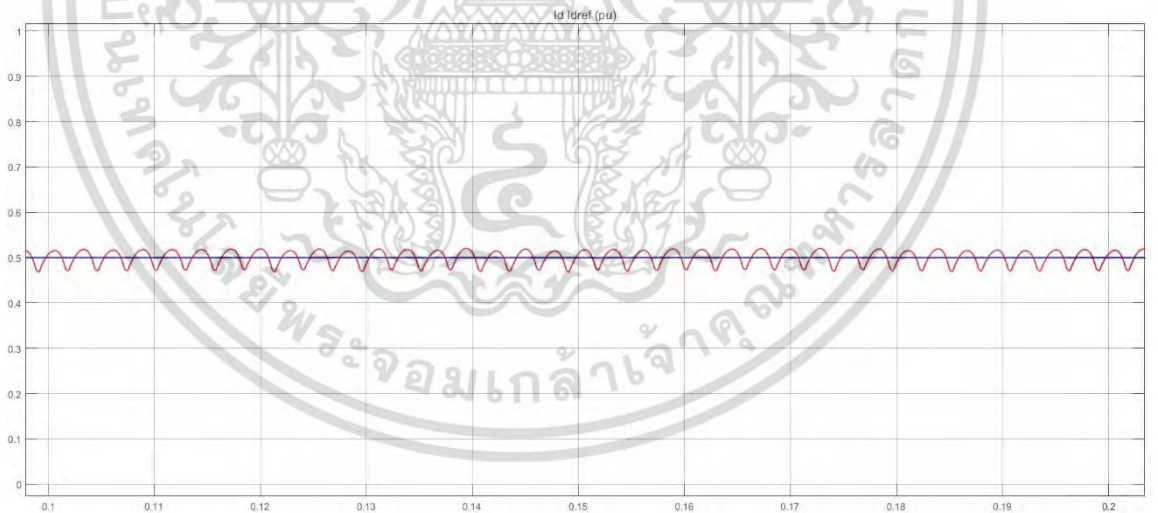
ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.1 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น 165° ทำให้เรกติไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่ง

พลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 315 kV และกระแสผิดพลาดถูกกำจัดออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 4.1 (จ)

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

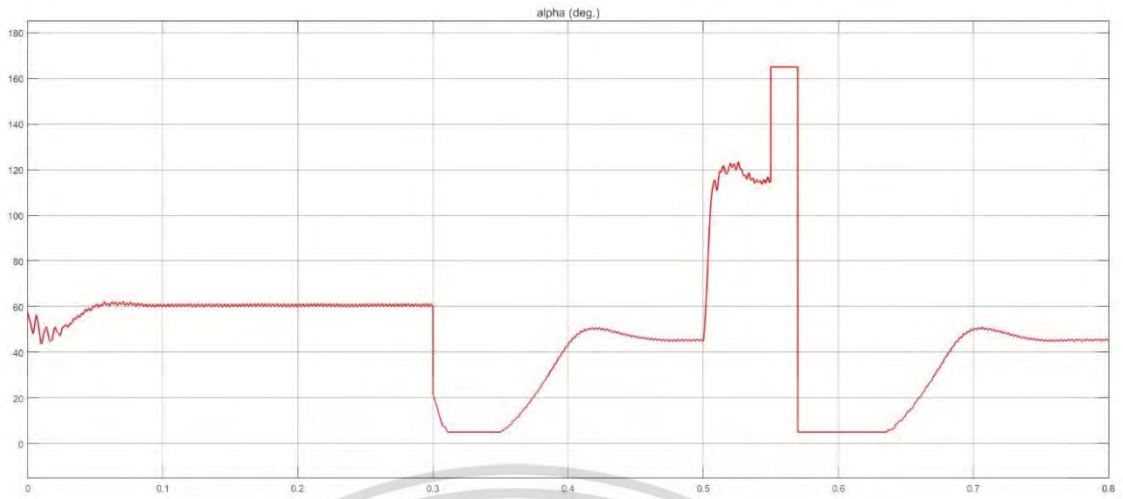


(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง (I_d , สีแดง) และกระแสอ้างอิง (I_{dref} , สีน้ำเงิน)

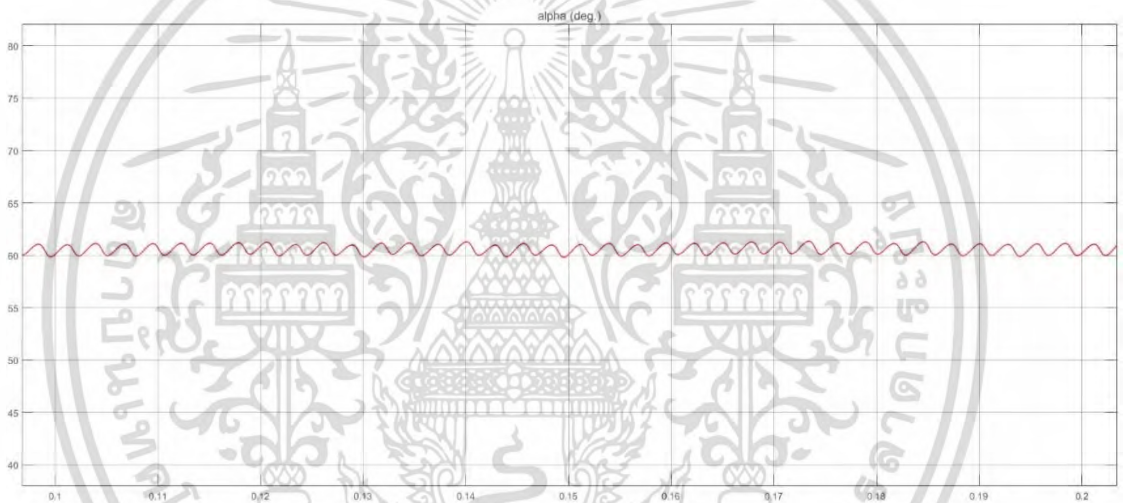


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

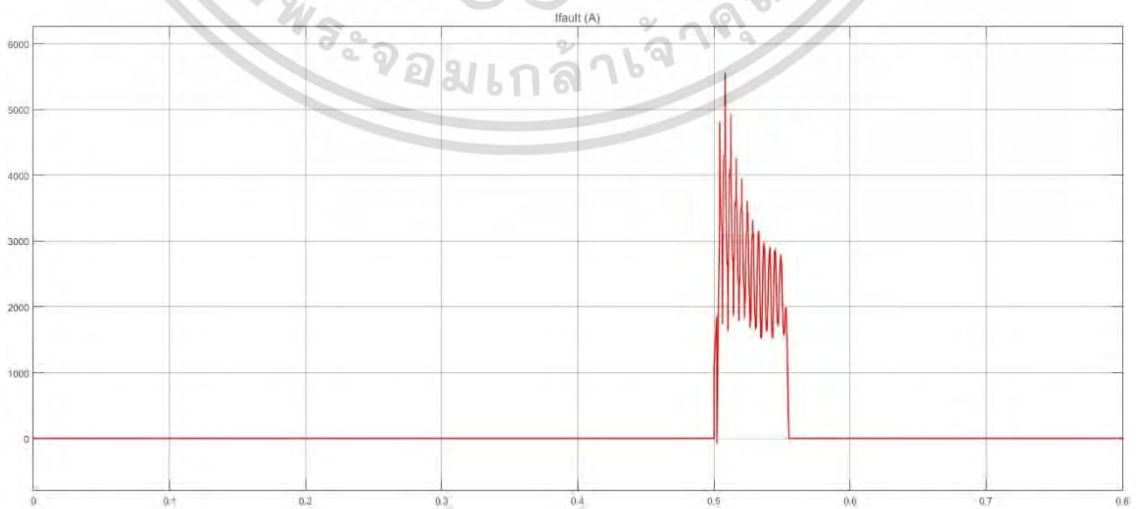
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) มุมจุดชนวน (Alpha angle)

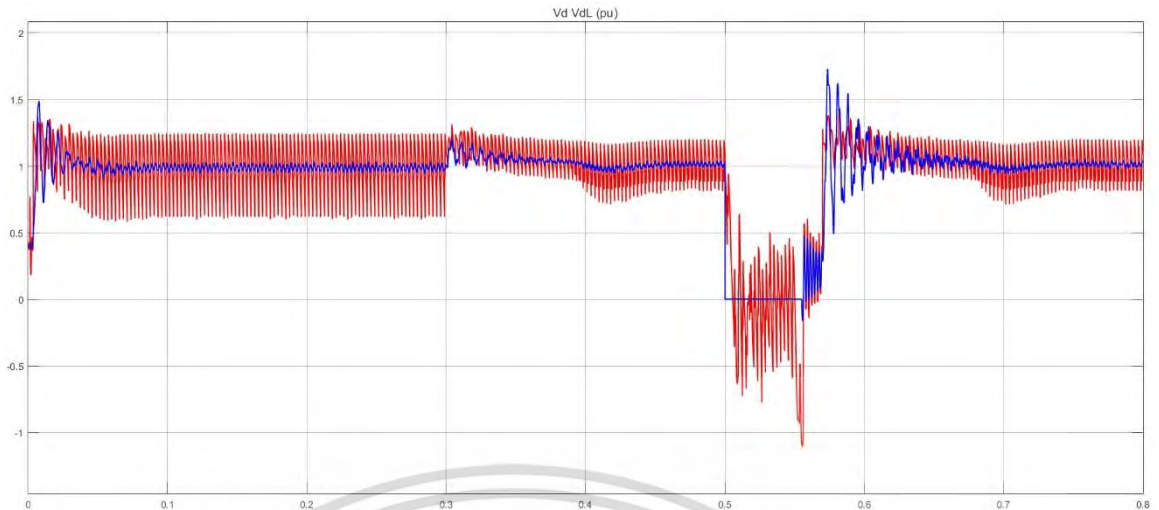


(ง) ภาพขยายมุมจุดชนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 - 0.2 วินาที



(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพลาด (Ifault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์และแรงดันต้นทางของสายส่ง
ที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

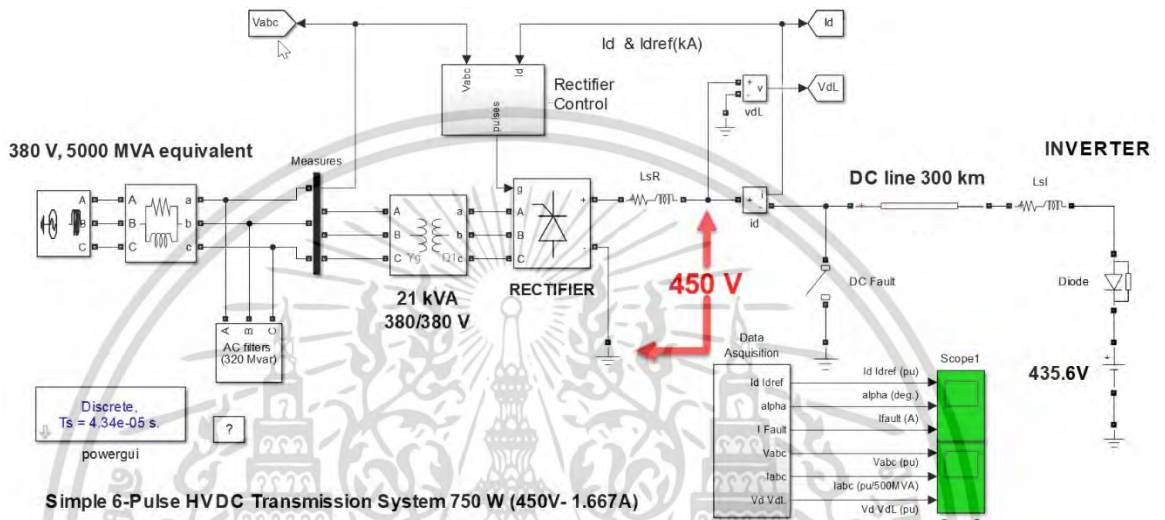
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW

(250kV- 2kA) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 450 V 750 W

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของชุดทดลองที่ออกแบบไว้ โดยจำลองผ่านระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยน าระบบตัวอย่างมาเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง 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 และมุมจุดชนวนที่ท าให้กระแสมีค่า 0.5 pu มีค่าประมาณ 60° 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 วินาทีจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมุมจุดชนวนลดลงจาก 60° เป็น 50° ดังรูปที่ 4.3 (ค)

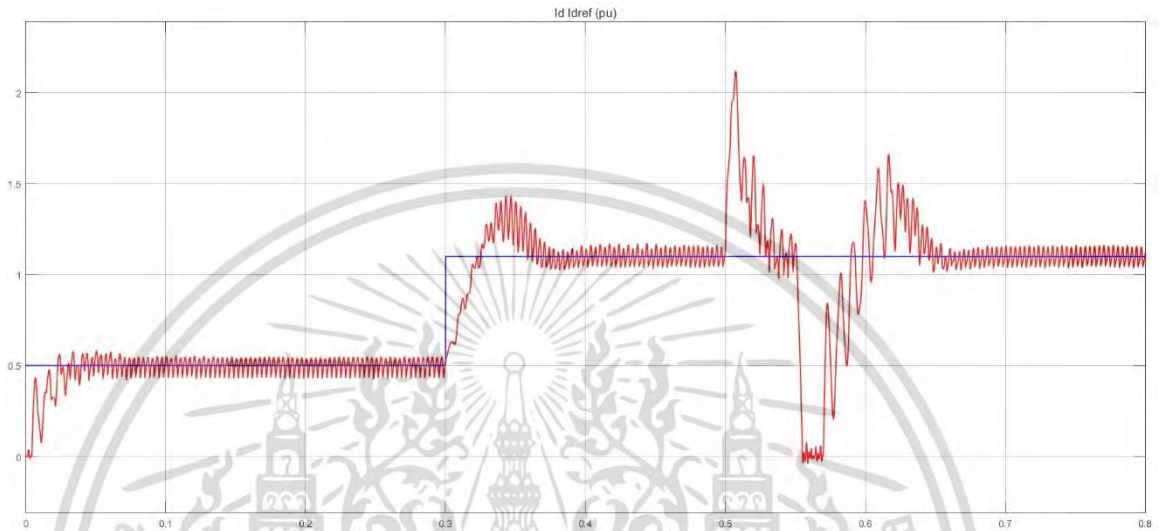
ช่วงเวลาจาก 0.5 ถึง 0.55 วินาที เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบที่เวลา 0.5 วินาที กระแสผิดพลาดสูงสุดมีค่าประมาณ 6 kA ดังรูปที่ 4.3 (จ)

ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.3 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น 165° ท าให้แรงดันไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่ง

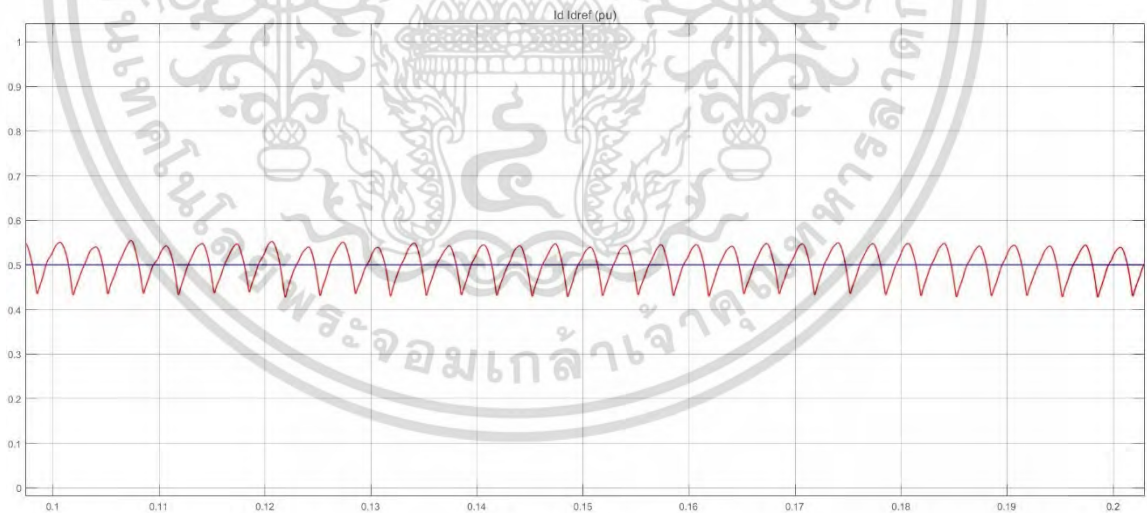
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 400 V และกระแสผิดพ้องถูกกำจัดออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 4.3 (จ)

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

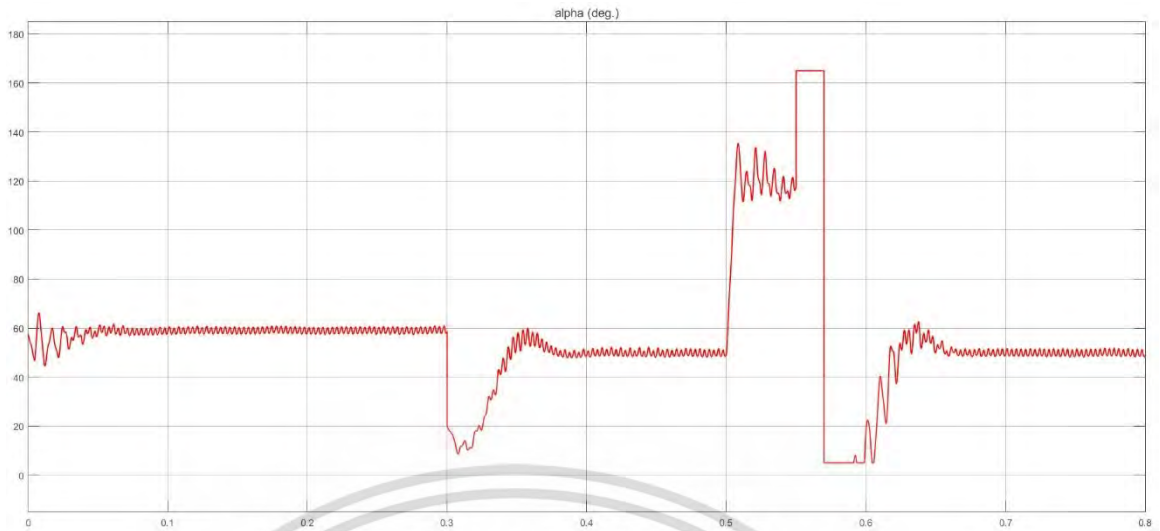


(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง (I_d , สีแดง) และกระแสอ้างอิง (I_{dref} , สีน้ำเงิน)

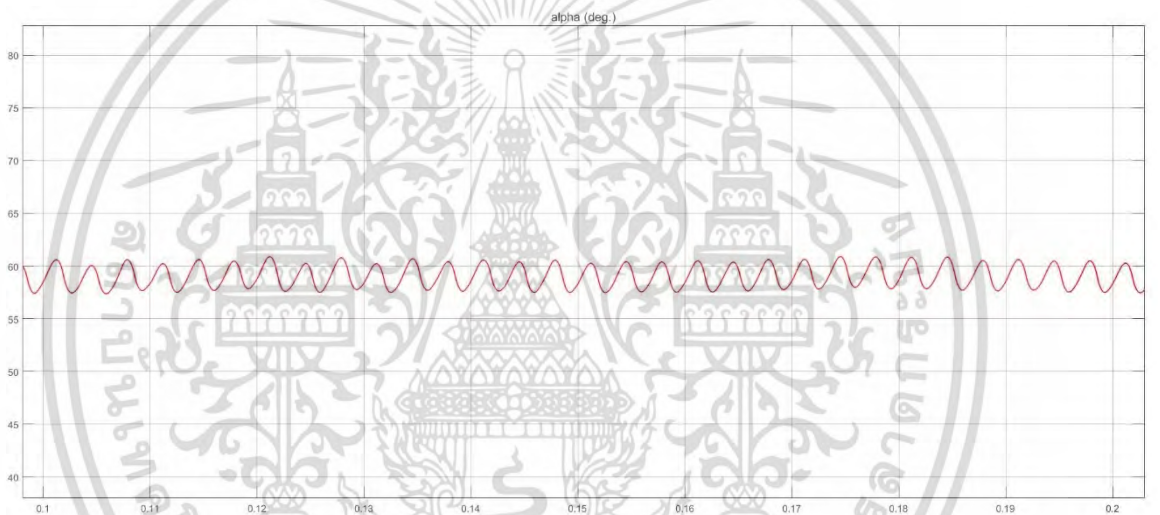


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

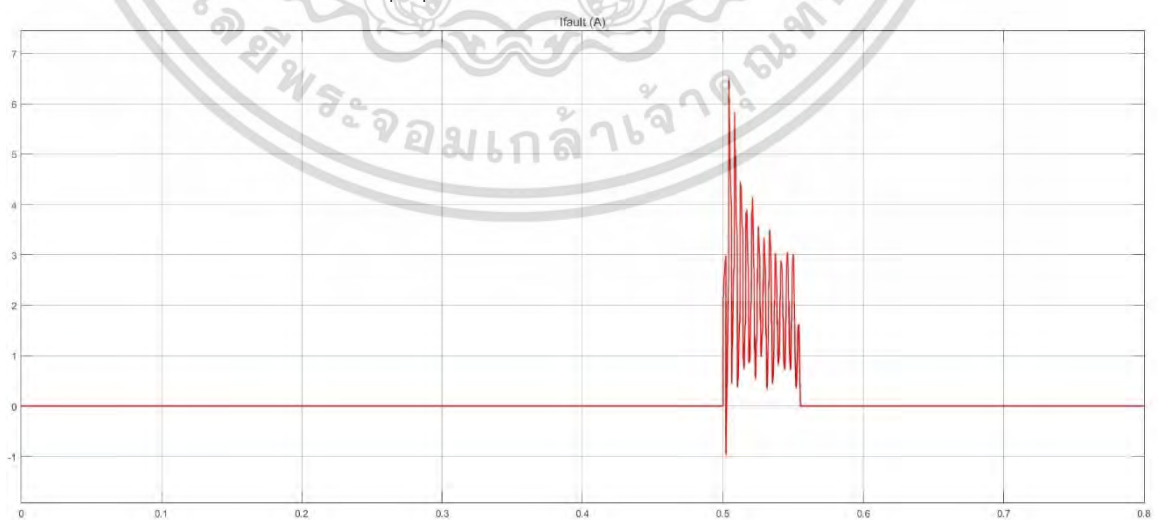
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ภาพมุมจุดชนวน (Alpha angle)

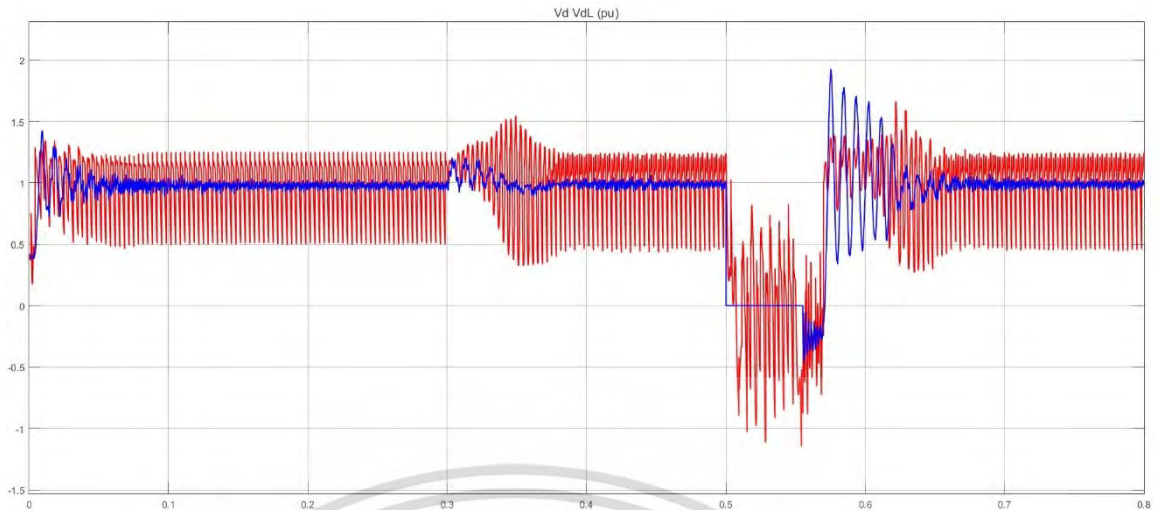


(ง) ภาพขยายมุมจุดชนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 - 0.2 วินาที

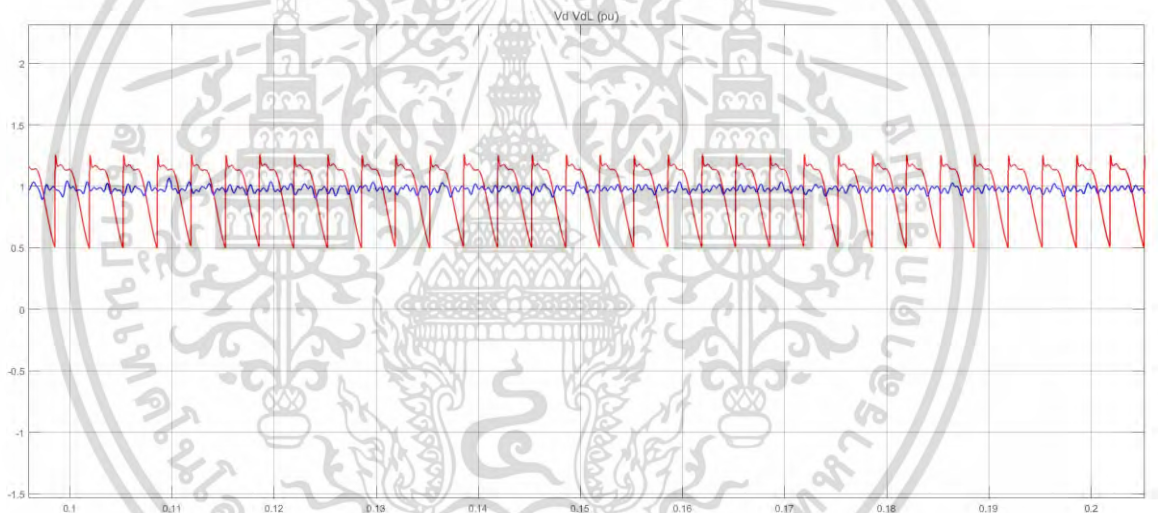


(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพลาด (Ifault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันที่ออกจากเรกติไฟเออร์และแรงดันต้นทางของสายส่ง
ที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

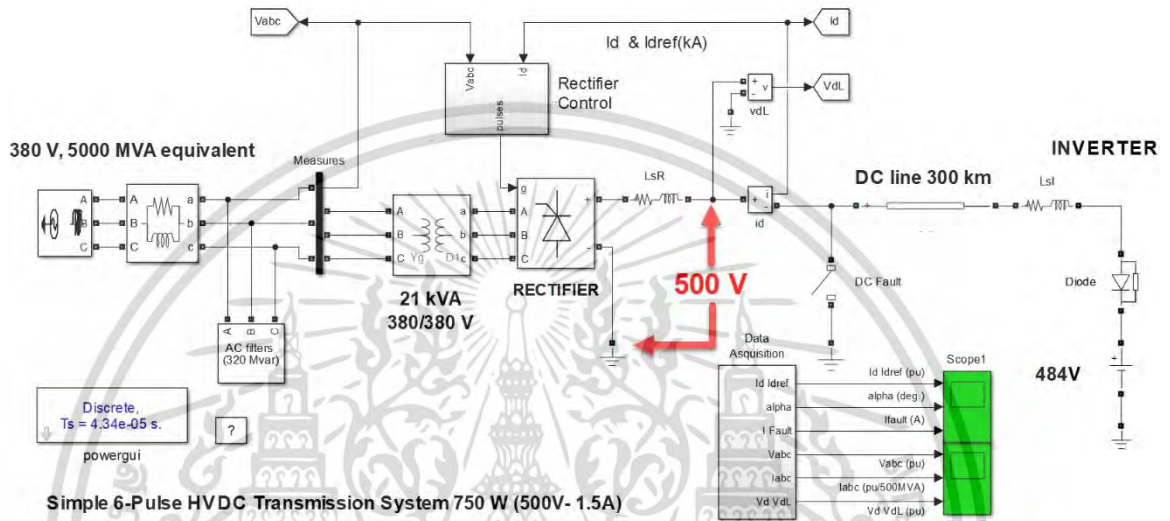
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 750 W

(450V - 1.667A) ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.8 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง 500 V 750 W

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงของชุดทดลองที่ออกแบบไว้ โดยจำลองผ่านระบบตัวอย่างจำลองระบบสายส่งกระแสตรงแรงดันสูง Simple 6-Pulse 500 MW (250kV- 2kA) แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยน ำระบบตัวอย่างมาเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง 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 และมุมจุดชนวนที่ α ให้กระแสมีค่า 0.5 pu มีค่าประมาณ 60° ดังรูปที่ 4.5 (ค)

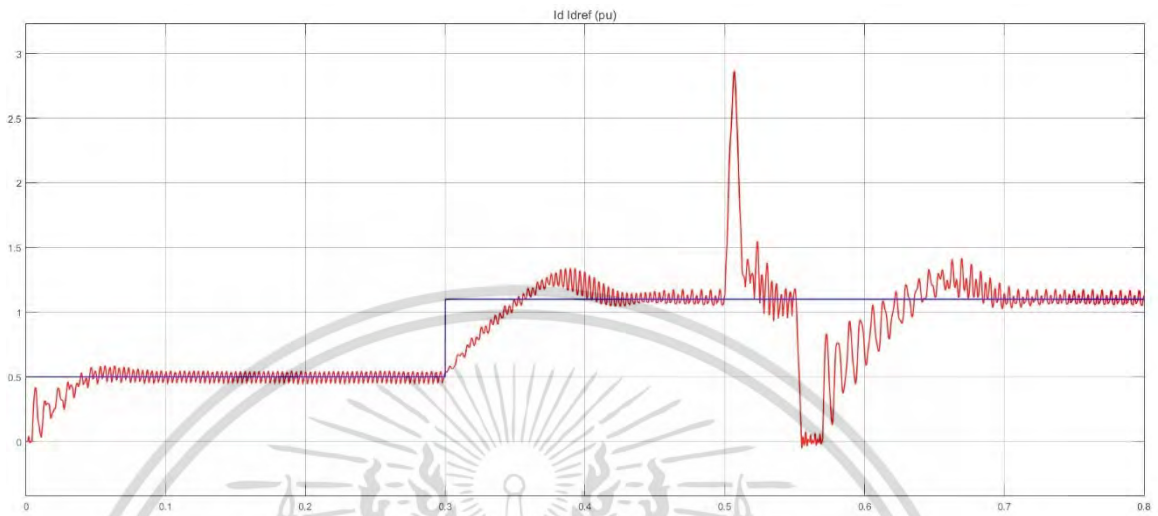
ช่วงเวลาจาก 0.3 ถึง 0.5 วินาที จากรูปที่ 4.5 (ก) ที่เวลา 0.3 วินาที กระแสอ้างอิงถูกตั้งค่าให้เพิ่มขึ้น 0.6 pu การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงใช้เวลาประมาณ 0.075 วินาทีจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวใหม่ และมุมจุดชนวนลดลงจาก 60° เป็น 50° ดังรูปที่ 4.5 (ค)

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

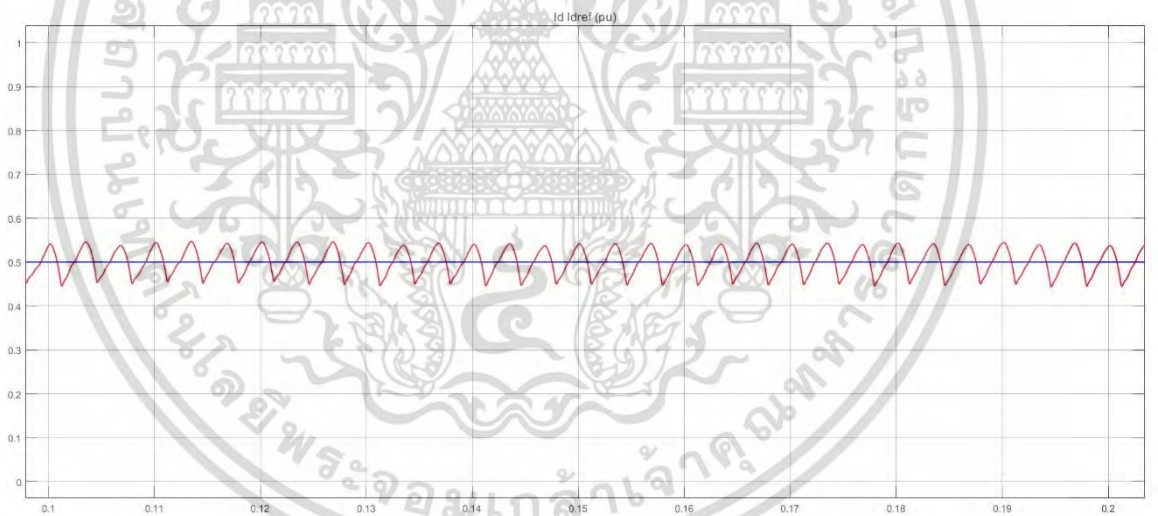
ช่วงเวลาจาก 0.55 ถึง 0.57 วินาที จากรูปที่ 4.5 (ค) ที่เวลา 0.55 วินาที มุมจุดชนวนถูกบังคับโดยระบบป้องกันให้เปลี่ยนเป็น 165° ท ำให้แรงดันไฟเออร์ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์และส่งพลังงานกลับไปยังโครงข่ายระบบ 400 V และกระแสผิดพลาดถูกกำจัดออกจากระบบดังแสดงในรูปที่ 4.5 (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

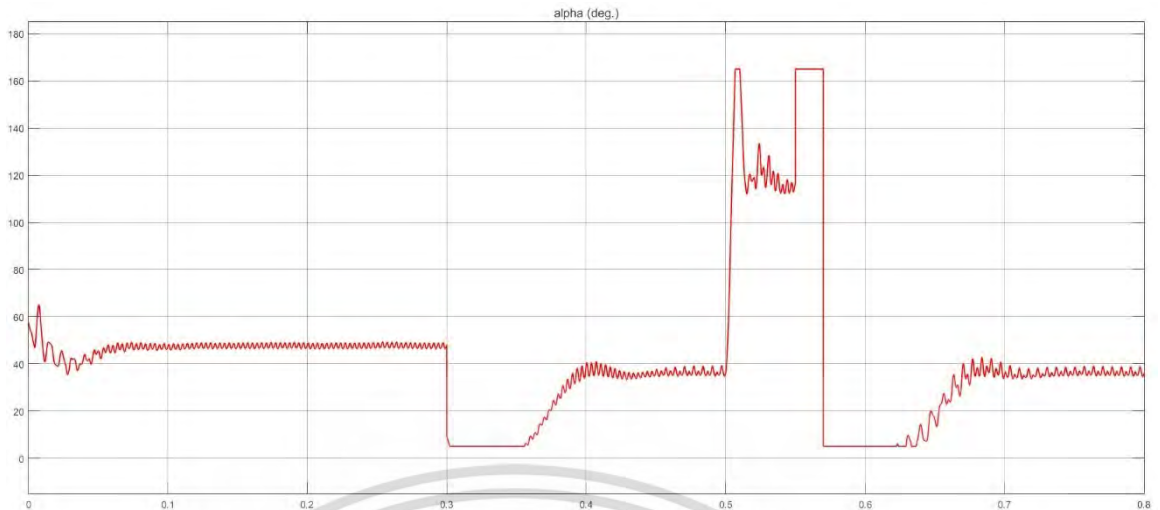


(ก) รูปคลื่นกระแสในสายส่ง (Id, สีแดง) และกระแสอ้างอิง (Idref, สีน้ำเงิน)

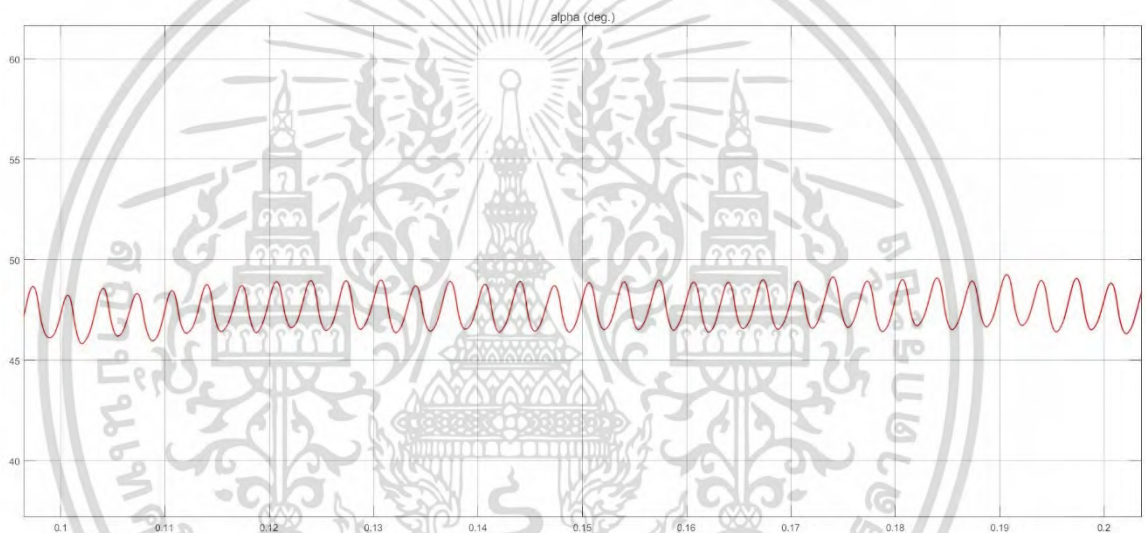


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสในสายส่งและกระแสอ้างอิงที่สภาวะปกติเวลา 0.1 – 0.2 วินาที

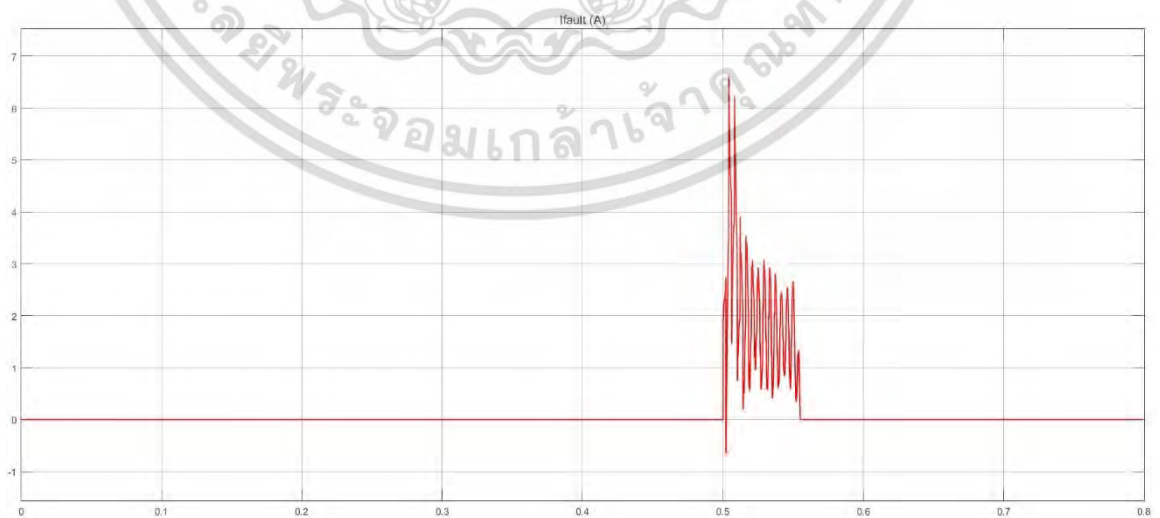
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) มุมจุดชนวน (Alpha angle)

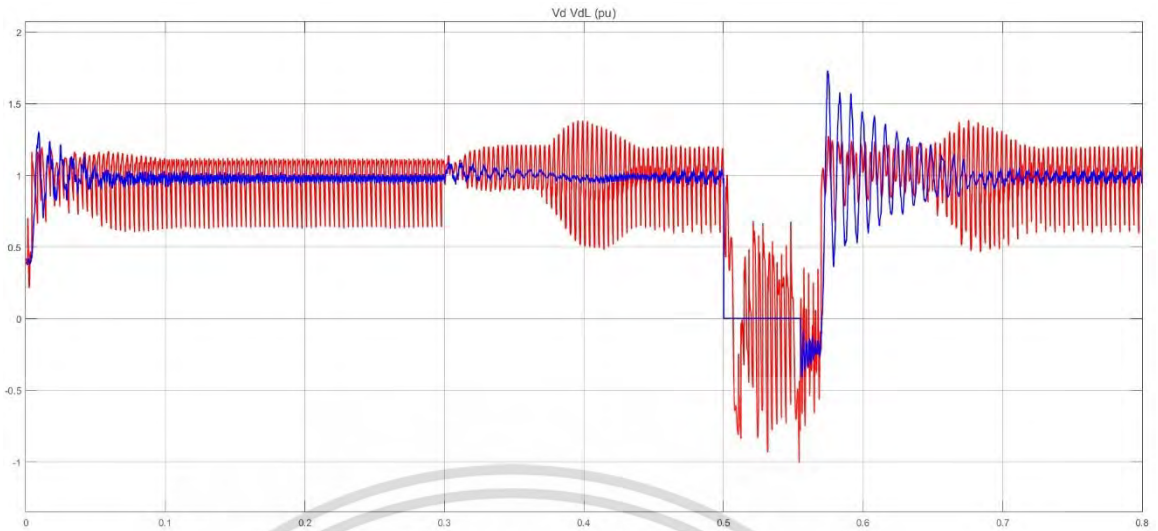


(ง) ภาพขยายมุมจุดชนวนที่สภาวะปกติเวลา 0.1 - 0.2 วินาที

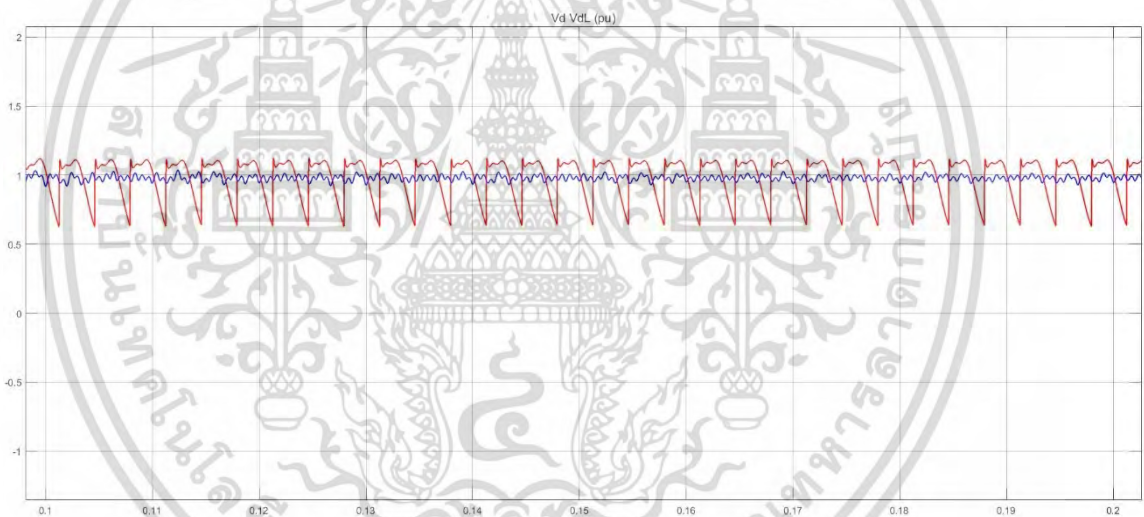


(จ) รูปคลื่นกระแสผิดพร่อง (Ifault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



(ข) 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 พบว่ามี
ลักษณะรูปคลื่นคล้ายกับระบบตัวอย่าง แต่กระแสที่พิกัดแรงดัน 450 V มีการแกว่งรอบกระแสอ้างอิง
และริบเปิดมากกว่าพิกัดแรงดัน 500 V เนื่องจากสายส่งพิกัดแรงดัน 500 V มีค่าความเหนี่ยวนำ
มากกว่า ทำให้ทรเปลี่ยนแปลงกระแสช้ากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคลื่นมมจุดชนวนของระบบจำลองที่ออกแบบแต่ละพิกัด ระบบตัวอย่างมีการแกว่งของมมจุดชนวนน้อยที่สุดเพราะระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบตัวอย่างถูกออกแบบมาดีแล้ว เมื่อนาระบบควบคุมแบบป้อนกลับของระบบตัวอย่างมาใช้กับระบบจำลองที่ออกแบบไว้ พบว่ามมจุดชนวนที่พิกัดแรงดัน 500 V มีการแกว่งมากกว่าที่พิกัดแรงดัน 450 V ซึ่งการแกว่งของมมจุดชนวนอาจทำให้ลดลงได้ด้วยการปรับค่าพีไอของระบบควบคุมป้อนกลับ

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

4.2 การจำลองระบบสำหรับสร้างเป็นชุดทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ออกแบบไว้สำหรับสร้างเป็นชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง วงจรของชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 3.8 จาองการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของสายส่ง ความยาวของสายส่งและพิกัดโหนด โดยกำหนดแรงดันที่เข้าเรกติไฟเออร์ 380 V และแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ 220 V

4.2.1 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง

จำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จำลองที่ความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร ผลการจำลองที่ความยาว 150 กิโลเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง และกระแสขาเข้าสายส่งแสดงดังรูปที่ 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 กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส 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 แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 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 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 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 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.665 A และ 809.5 W ตามลำดับ ที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 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

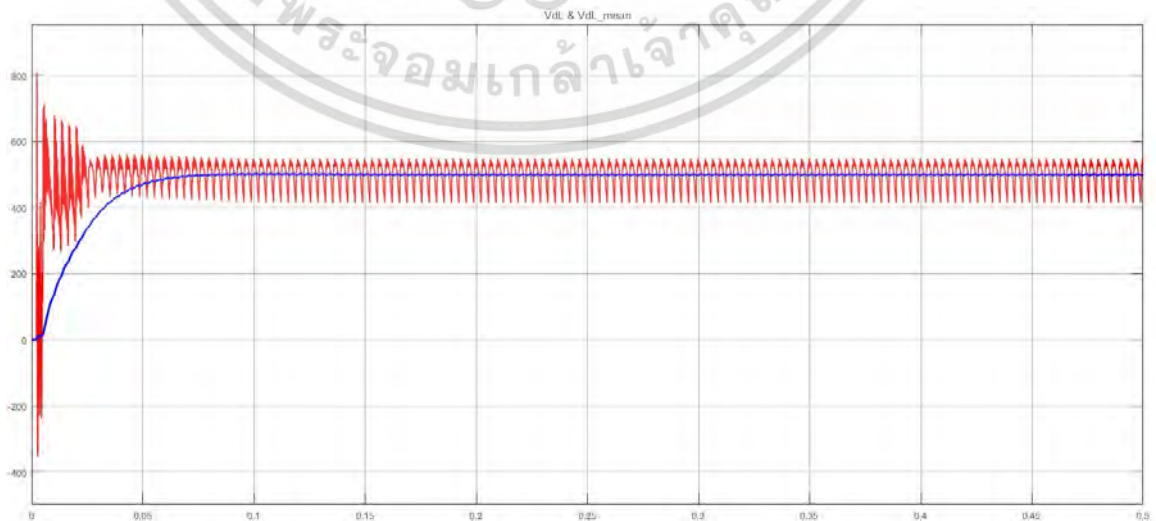
ตารางที่ 4.3 ปริมาณไฟฟ้าทั้งแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหลดมีค่าใกล้เคียงกันแม้มีการเปลี่ยนแปลงระยะสายส่ง โดยที่ระยะ 150 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของโหลดเฟส A ได้เท่ากับ 218.8 V 1.13 A และ 247.3 W ตามลำดับ ที่ระยะ 300 กิโลเมตร วัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของโหลดเฟส 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)	ก กำลังไฟฟ้าจริง (W)			
	ต าแห่งA	ต าแห่งB	ต าแห่งC	ต าแห่งD
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

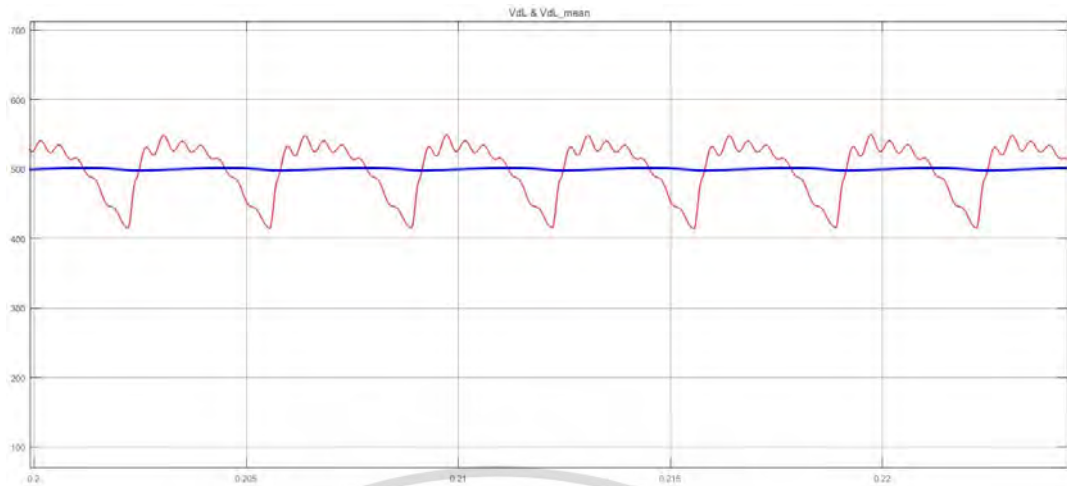
จากตารางที่ 4.4 ก กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างต าแห่ง A และ B) ของแต่ละระยะสายส่งมีค่าเกือบคงที่เท่ากับ 7.6 8 และ 8 W ตามล าดับแต่ก กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างต าแห่งB และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.8 0.7 และ 10.8 W ตามล าดับ และกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างต าแห่ง C และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 66.3 73.4 และ 72 W ตามล าดับ

จากผลการจำลองเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นพบว่า ที่ความยาวสายส่ง 150 กิโลเมตร เกิดแรงดันตกในสายส่ง 0.92% โหลดได้รับก าลังไฟฟ้า 99.66% ที่ความยาวสายส่ง 300 กิโลเมตร ท ำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 1.66% โหลดได้รับก าลังไฟฟ้า 99.91% และที่ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร ท ำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.34% โหลดได้รับก าลังไฟฟ้า 98.69% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันตกที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความยาวที่เพิ่มขึ้น และหากไม่ปรับ Modulation index ของอินเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันขาออก โหลดจะได้รับก าลังไฟฟ้าลดลงไม่มาก

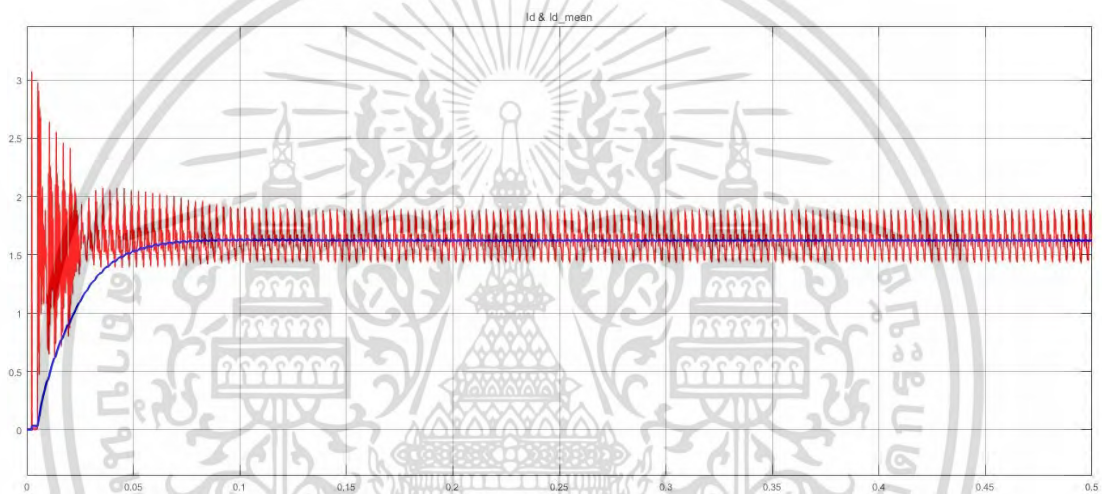


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำ เงิน)

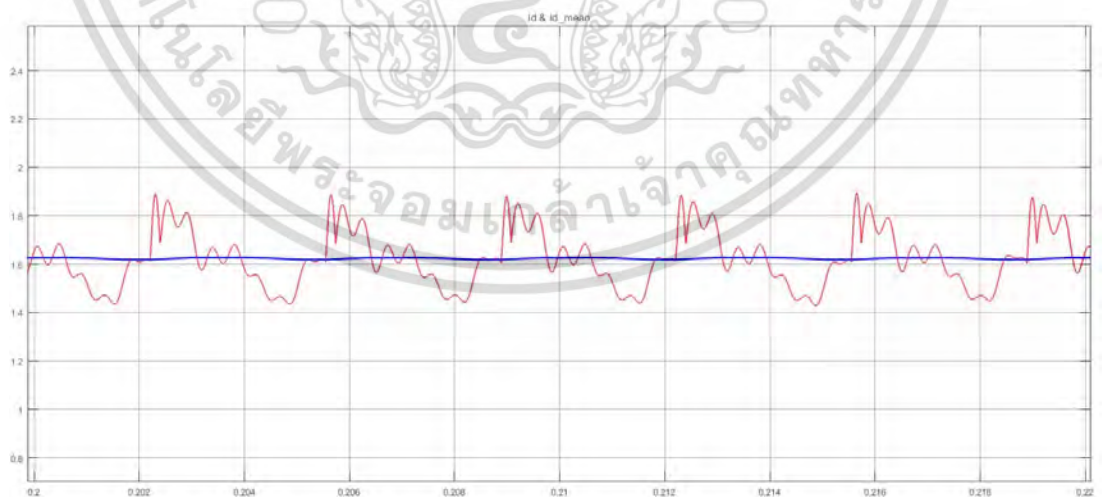
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว



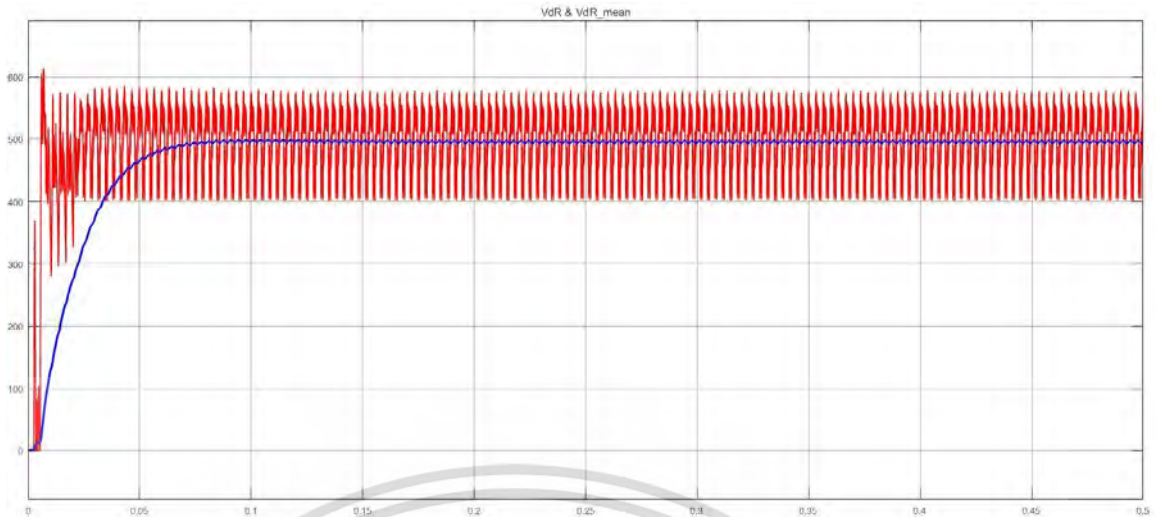
(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



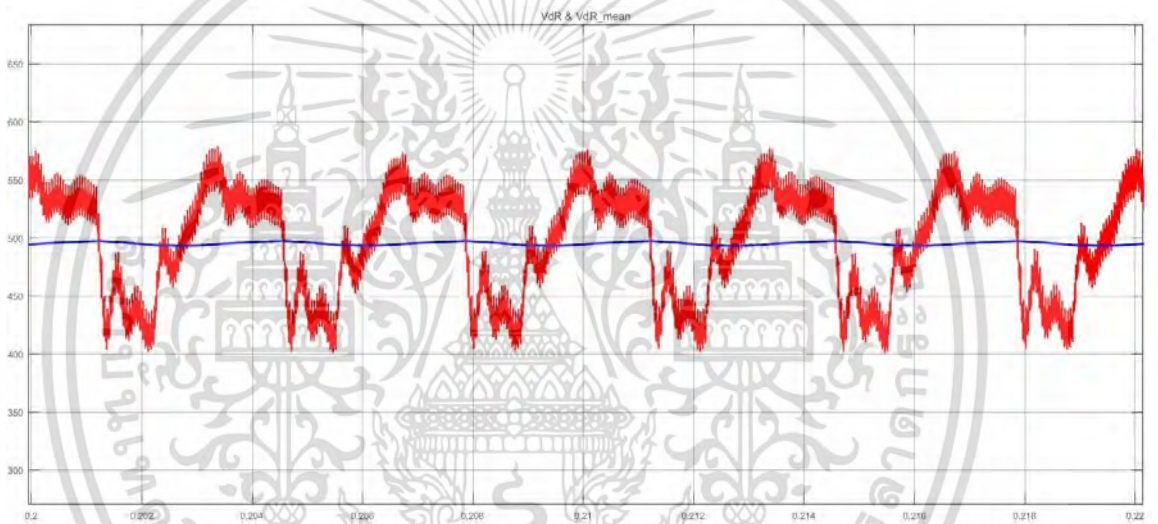
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.6 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร

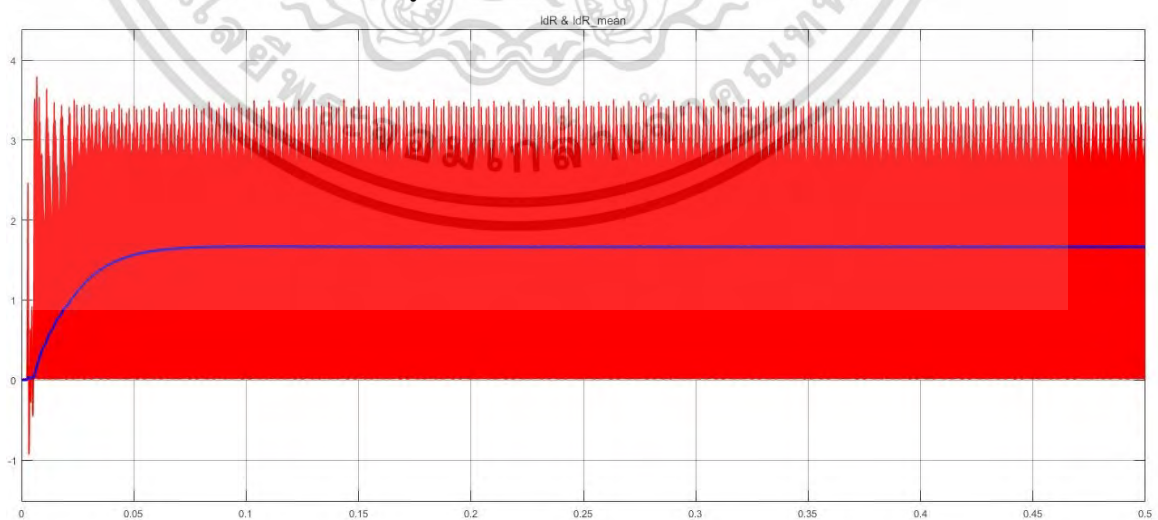
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

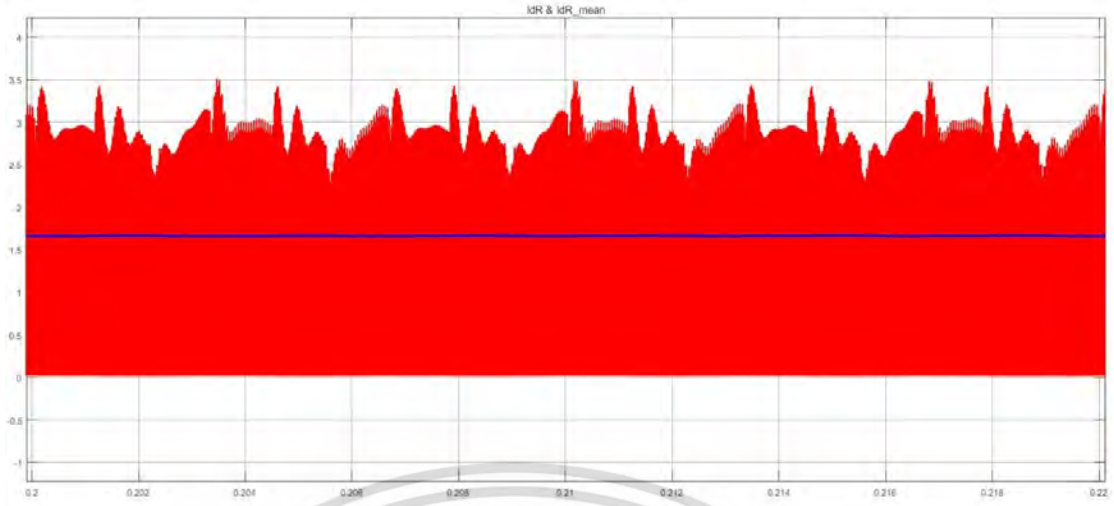


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

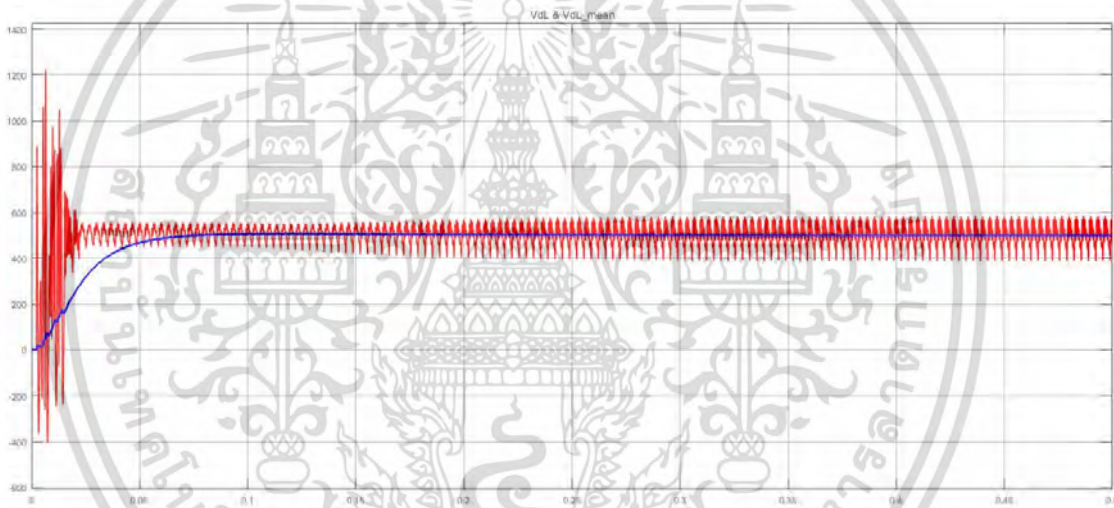


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

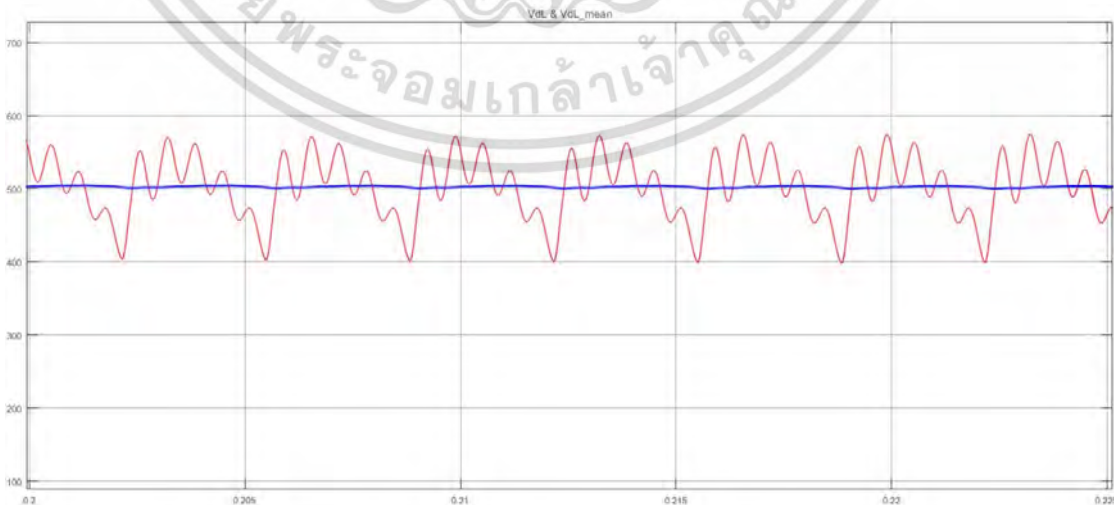
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร

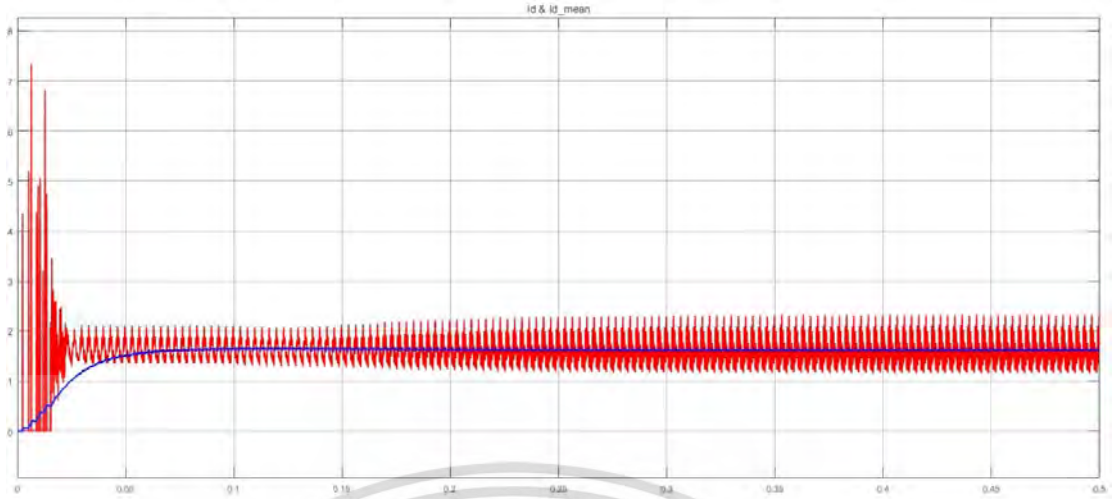


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

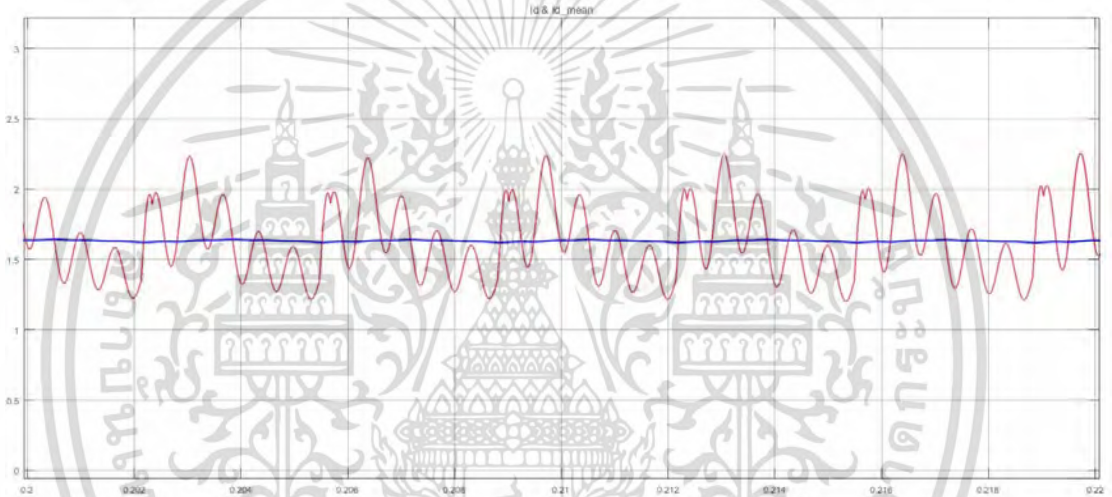


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

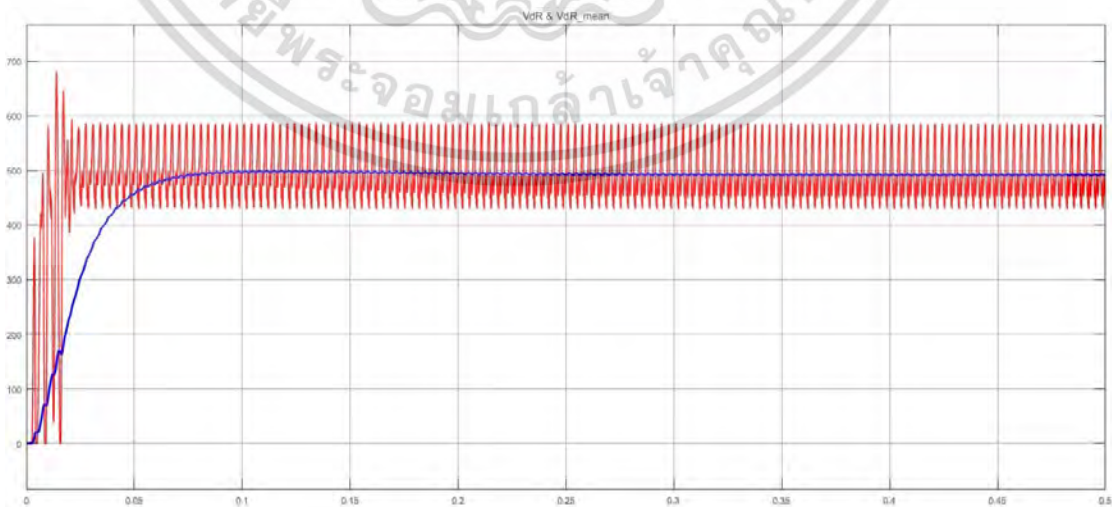


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



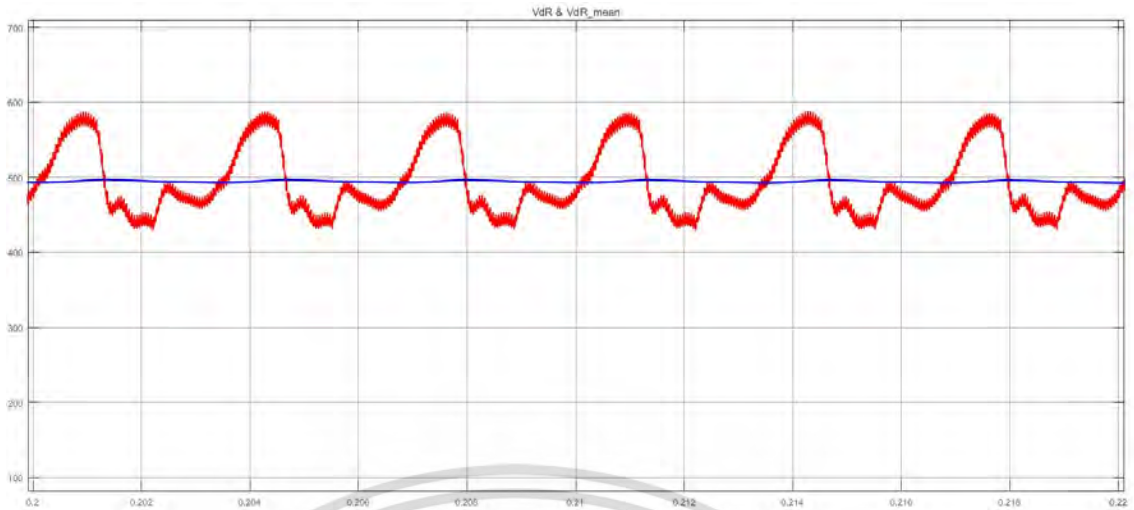
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

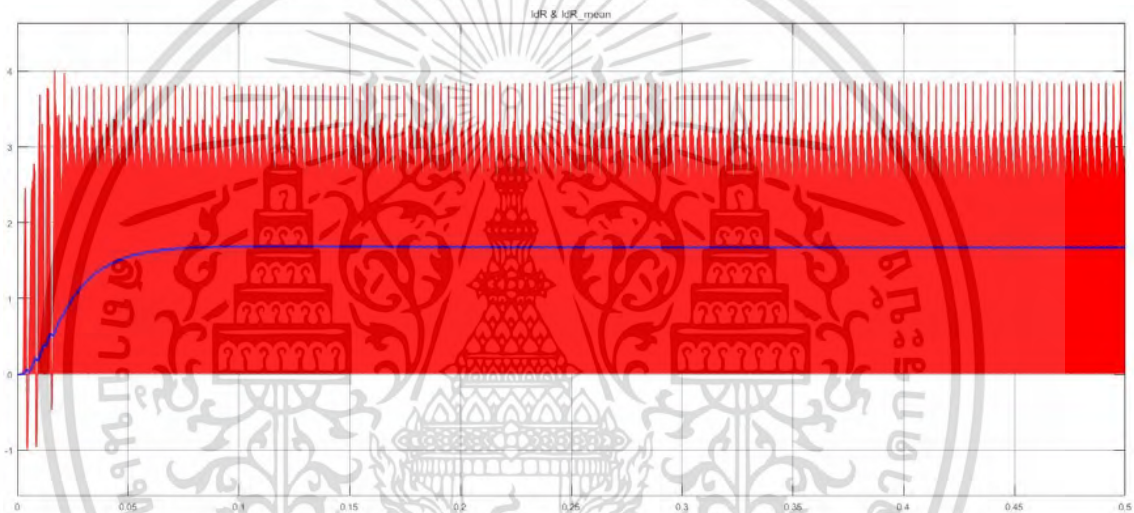


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

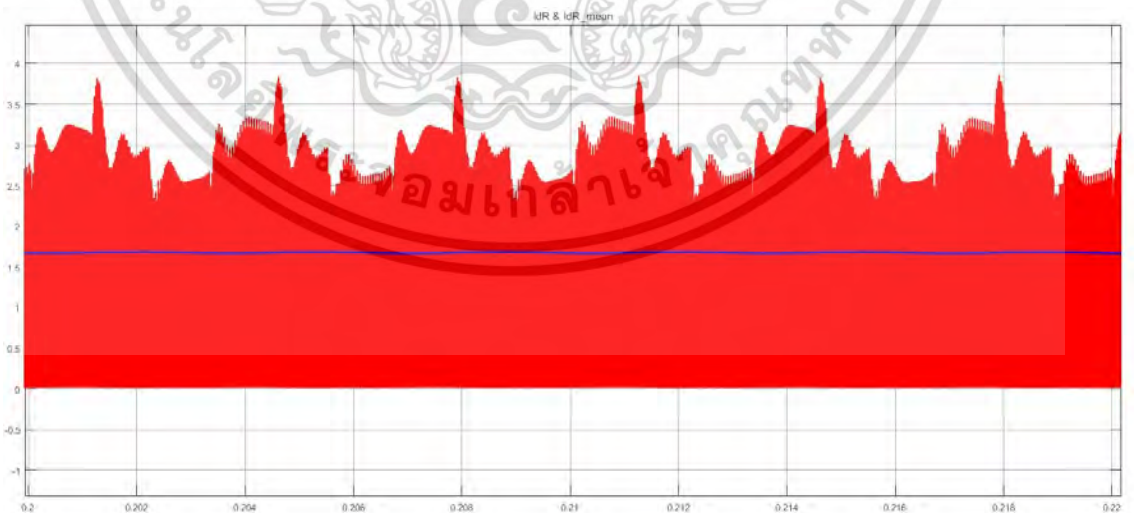
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว



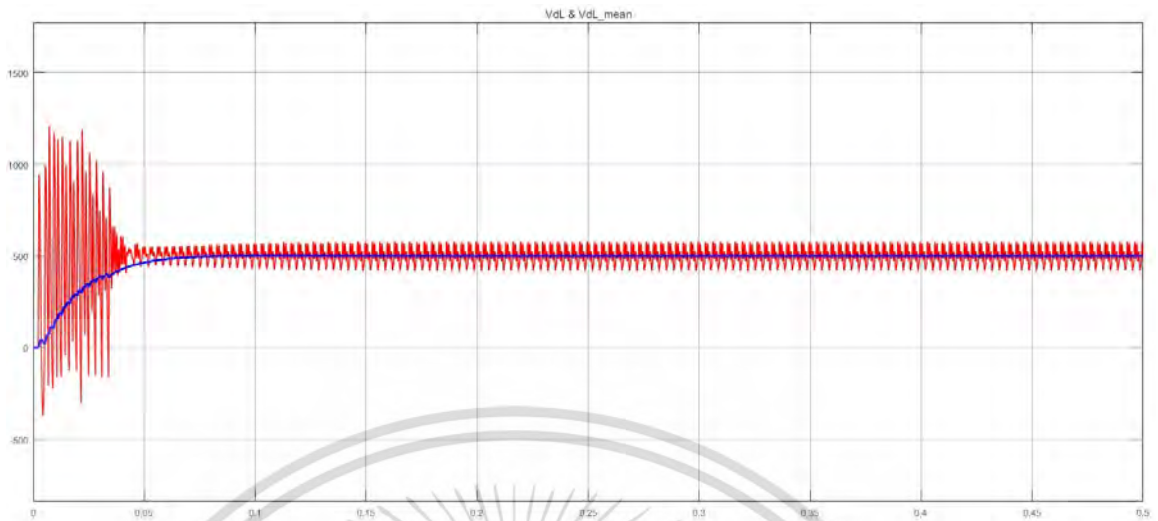
(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



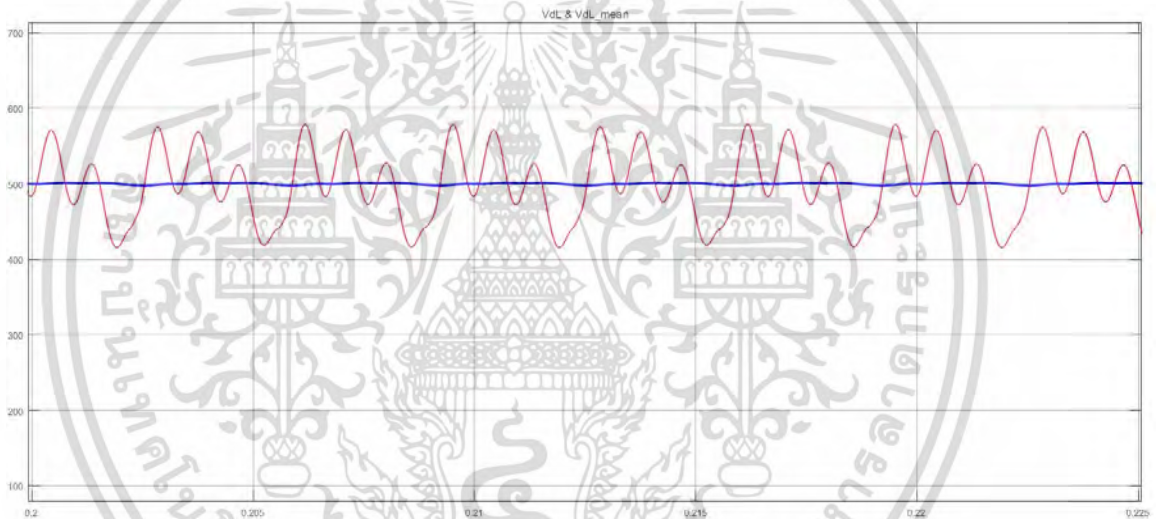
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.9 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

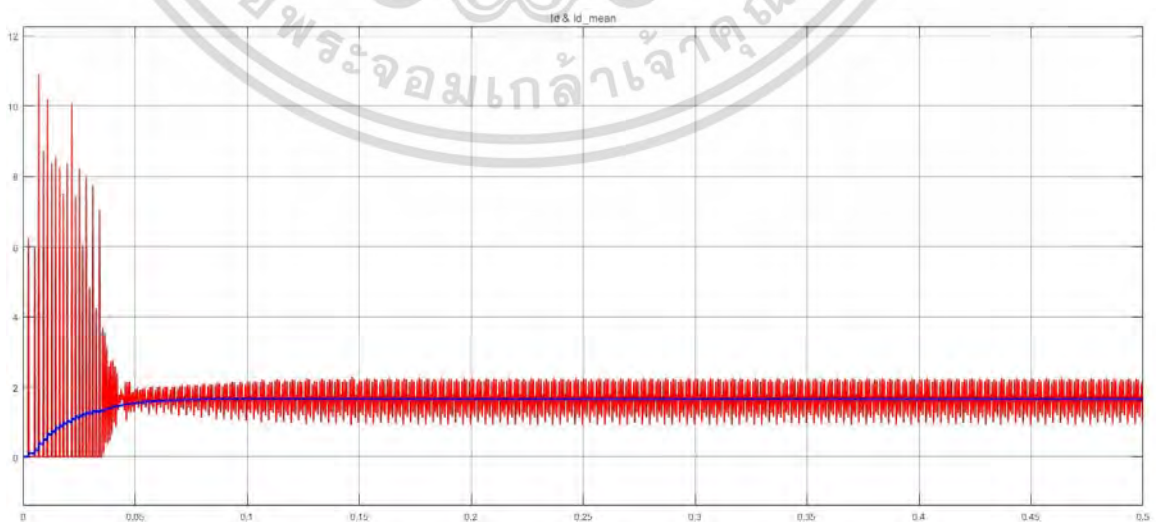
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

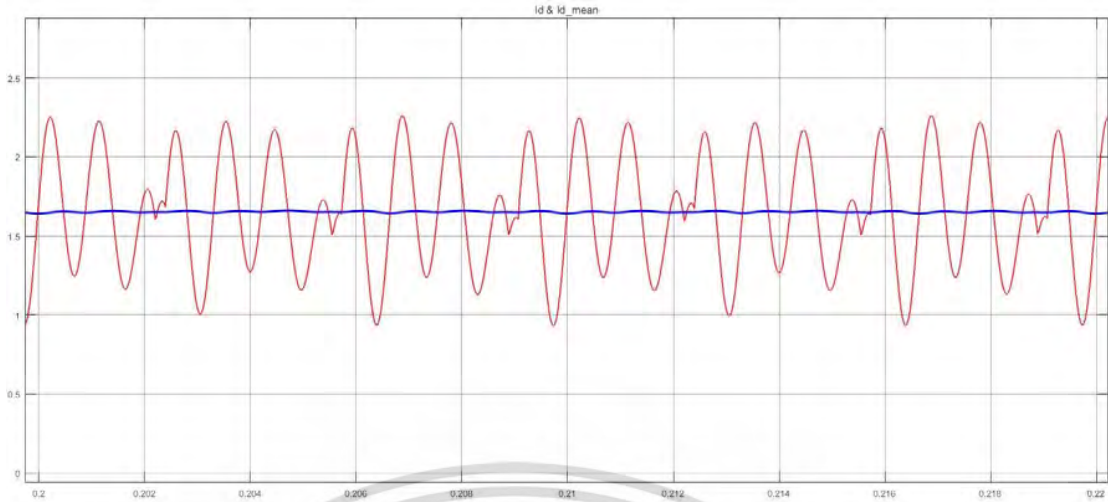


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว



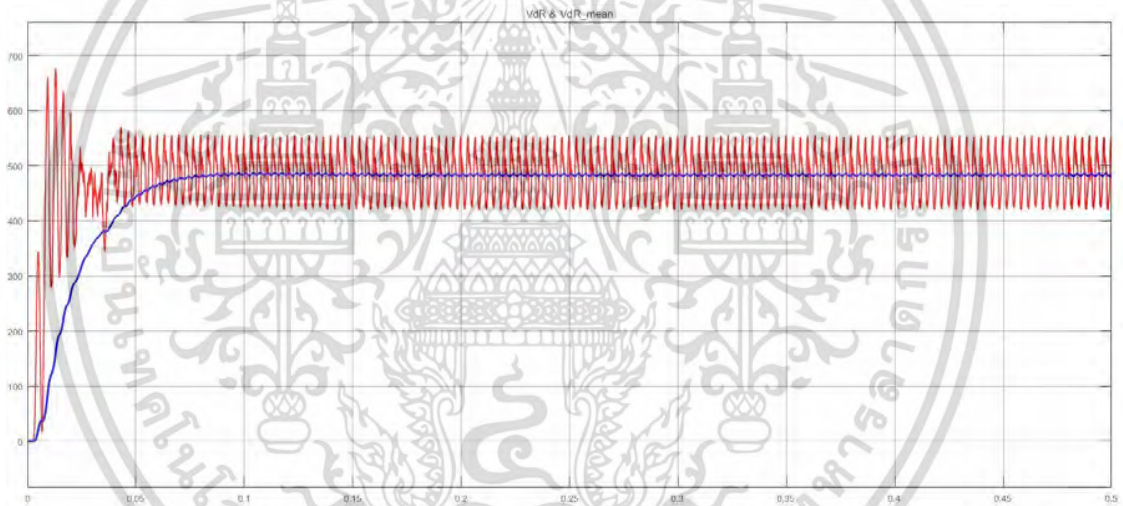
(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

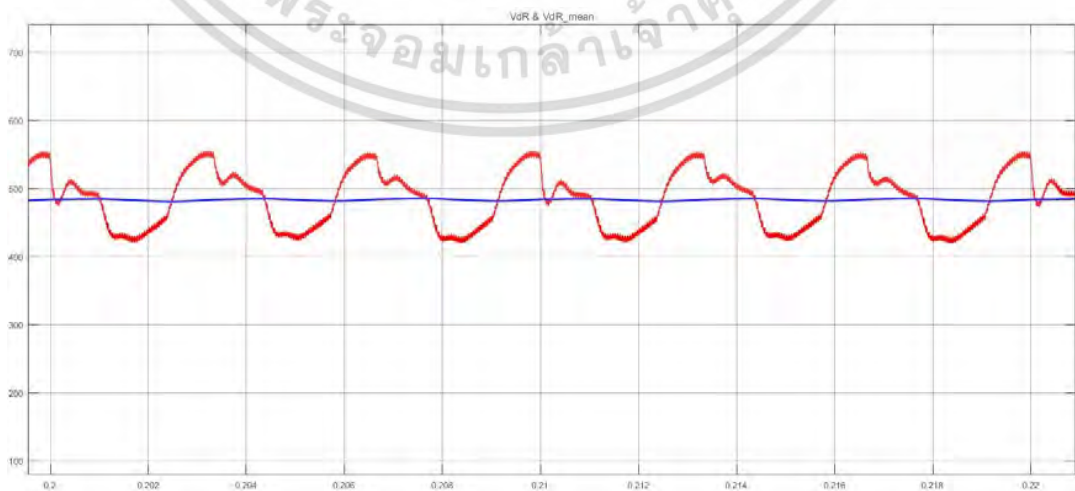


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.10 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร

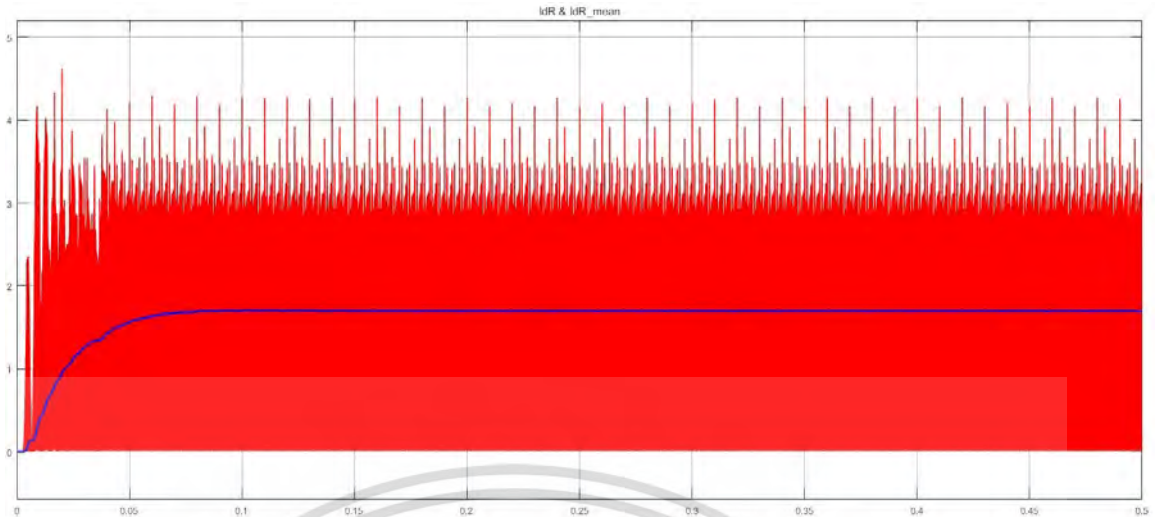


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

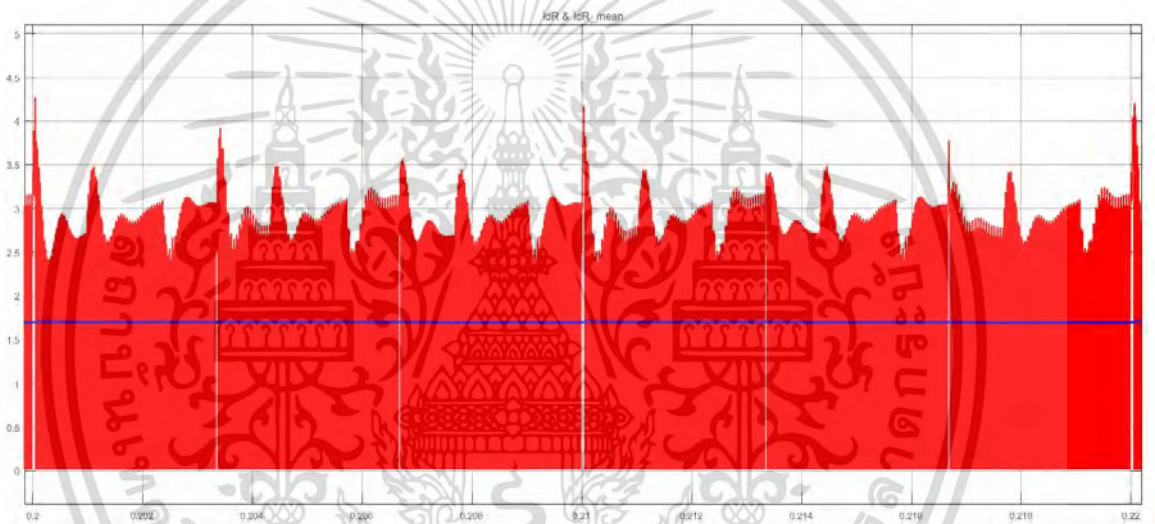


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ 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 มีอัตราการแกว่งที่มากขึ้นและช่วงเวลาการแกว่งมากขึ้น และเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งเป็น 600 กิโลเมตร พบว่าแตกต่างเพียงช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสก่อนเข้าสายส่งกระแสตรง พบว่ามีแนวโน้มของอัตราการแกว่งและริบเปิดไปในทางเดียวกันกับของรูปคลื่นแรงดัน เมื่อพิจารณาที่ระยะสายส่ง 150 กิโลเมตร พบว่ารูปคลื่นมีริบเปิดต่ำ อัตราการแกว่งของรูปคลื่นน้อย และการแกว่งของรูปคลื่นมีความรุนแรงน้อย เมื่อเปลี่ยนระยะสายส่งเป็น 300 กิโลเมตร รูปคลื่นกระแสมีค่าริบเปิดสูงขึ้น อัตราการแกว่งและความรุนแรงมากขึ้นกว่าระยะก่อนหน้า ที่ระยะสายส่ง 600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลเมตร พบว่าอัตราการแกว่งที่ระยะนี้มีค่าการจ นวนรูปคลื่นการแกว่งที่ลดลง แต่มีการแกว่งที่รุนแรงมากกว่าระยะอื่น เป็นสาเหตุให้ขนาดรีปเปิลของรูปคลื่นกระแสที่ระยะนี้มีมากกว่าระยะอื่น

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

4.2.2 ผลการจ าลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจ าลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จ าลองที่พิกัดโหลด 750 และ 1500 W

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

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

ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อส่งจ่ายไฟฟ้าที่พิกัดโหลดสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าทางด้านหม้อแปลงทุติยภูมิมีค่าลดลงเนื่องจากกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดันตก 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 ตามล าดับ

ตารางที่ 4.5 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

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
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	278.2	572.6
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	279.2	572.4
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	278.1	572.7
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	50.13	61.46
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	50.77	61.06
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	51.47	60.97

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
ก กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	827.5	1709
ก กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	816.7	1597

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 ปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้าสายส่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.4 นั้นคือแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่ 750 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและก ลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1.653 A และ 827.5 W ตามล าดับและที่โหลด 1500 W วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 3.405 A และ 1709 W ตามล าดับและเมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าบริเวณปลายทางสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่ 750 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 483.3 V และที่ โหลด 1500 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 467.3 V ส่วนกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ พิกัดโหลดเพิ่มขึ้น โดยที่โหลด 750 W ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 1.698 A และ 816.7 W ตามล าดับและที่พิกัดโหลด 1500 W ค่ากระแสไฟฟ้าและก ลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 3.447 A และ 1597 W ตามล าดับ

ตารางที่ 4.7 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาว สายส่ง 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
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	248.9	499.3
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	246.8	498.5
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	249.0	500.5
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	0	0
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	0	0
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

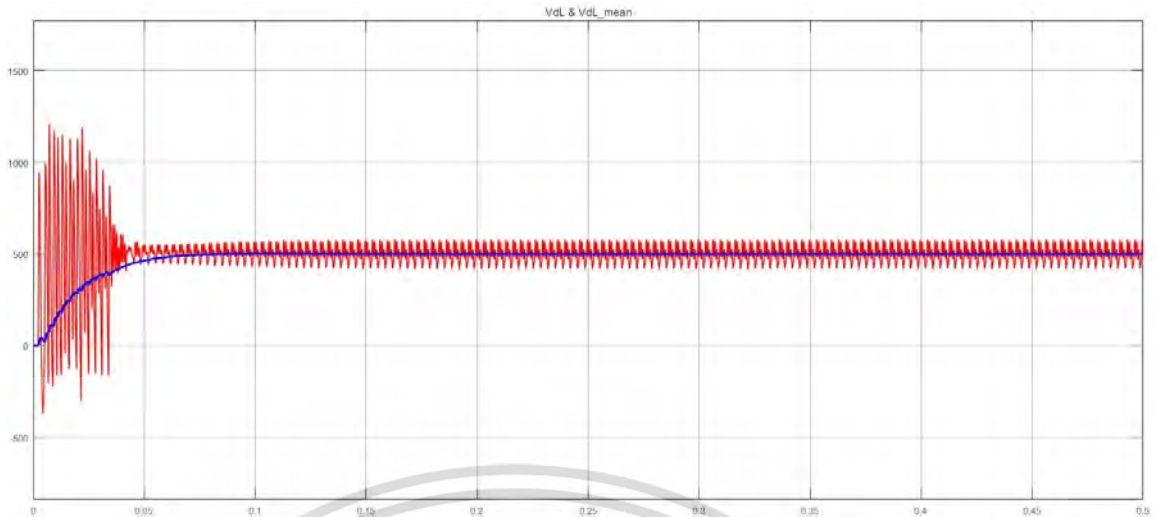
ตารางที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีค่าใกล้เคียงพิกัดแรงดัน ทำให้โหลดดึงกำลังไฟฟ้าจริงสามเฟสได้ใกล้เคียงกับค่าพิกัดโหลด ที่โหลด 750 W วัดค่าแรงดันไลน์ กระแสเฟส AB และกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 219.5 V 1.134 A และ 248.9 W ตามลำดับ และที่พิกัดโหลด 1500 W วัดค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ กระแสไฟฟ้าเฟส AB และก กำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 219.8 V 2.271 A และ 499.3 W ตามล าดับพบว่ากระแสและก ำลังไฟฟ้าแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบก ำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ หน่งต่าง ๆ จากการจ าลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

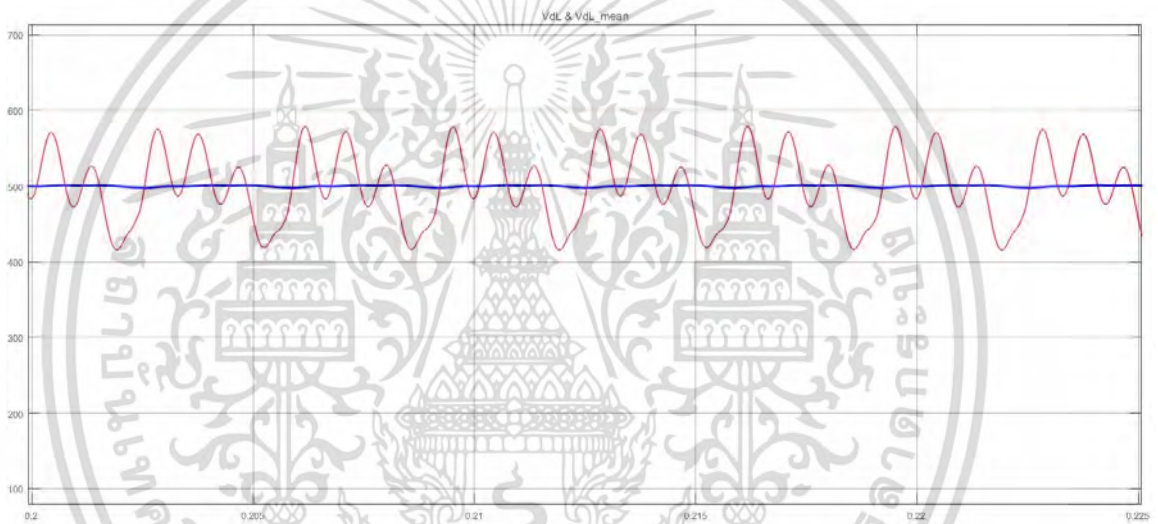
พิกัดโหลด (W)	ก ำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ต า านแห่งA	ต า านแห่งB	ต า านแห่งC	ต า านแห่งD
750	835.5	827.5	816.7	744.7
1500	1717.7	1709.0	1597.0	1498.3

จากตารางที่ 4.8 ก ำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างต า านแห่งA และ B) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 และ 8.7 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างต า านแห่งB และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.8 และ 112 W ตามล าดับและก ำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และตัวกรอง (ระหว่างต า านแห่งC และ D) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 72 และ 98.7 W ตามลำดับ จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลดเกิดขึ้นกับสายส่ง

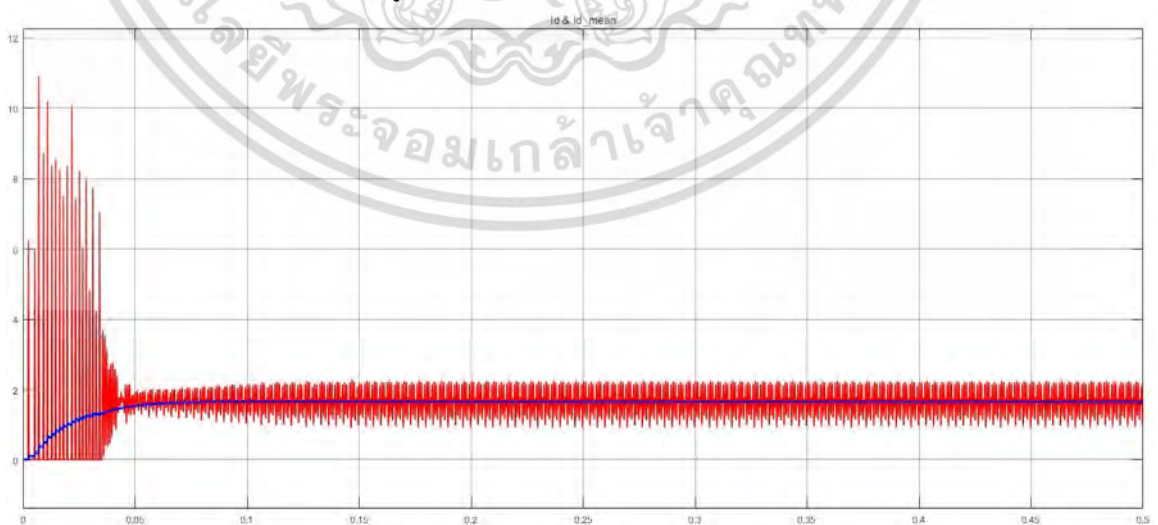
จากผลการจ าลองที่พิกัดโหลด 750 W เกิดแรงดันตกในสายส่ง 3.14% เกิดก ำลังสูญเสียในสายส่ง 1.04% และโหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 98.96% ที่พิกัดโหลด 1500 W ทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่ง 6.88% เกิดก ำลังสูญเสียในสายส่ง 6.55% โหลดได้รับกำลังไฟฟ้า 93.45% ผลการจ าลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดโหลดสูงชันทำให้เปอร์เซ็นต์แรงดันตกที่เกิดในสายส่งเพิ่มขึ้น และหากไม่ปรับ Modulation index ของอินเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันขาออก โหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าลดลงอย่างมาก



(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

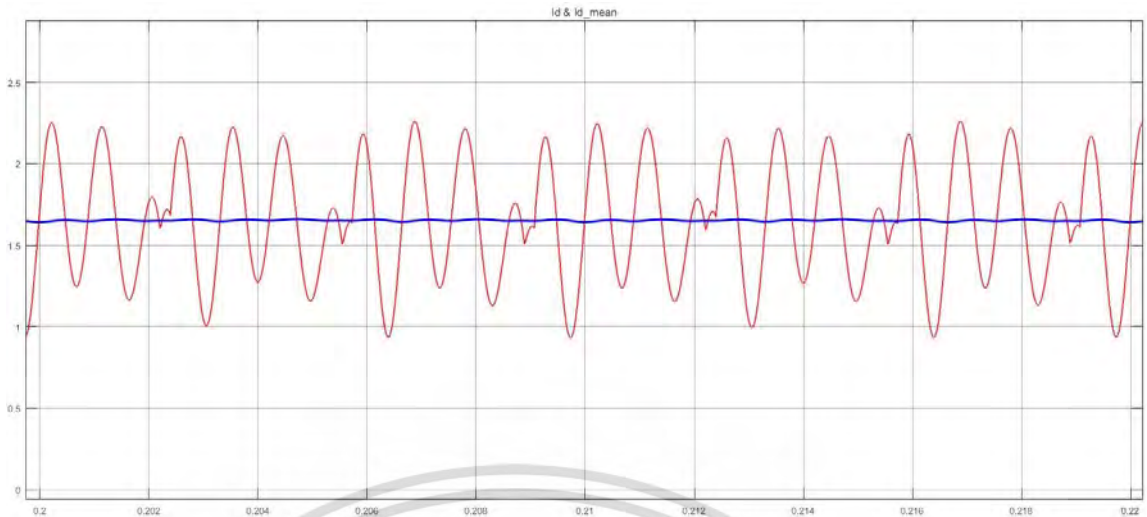


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว



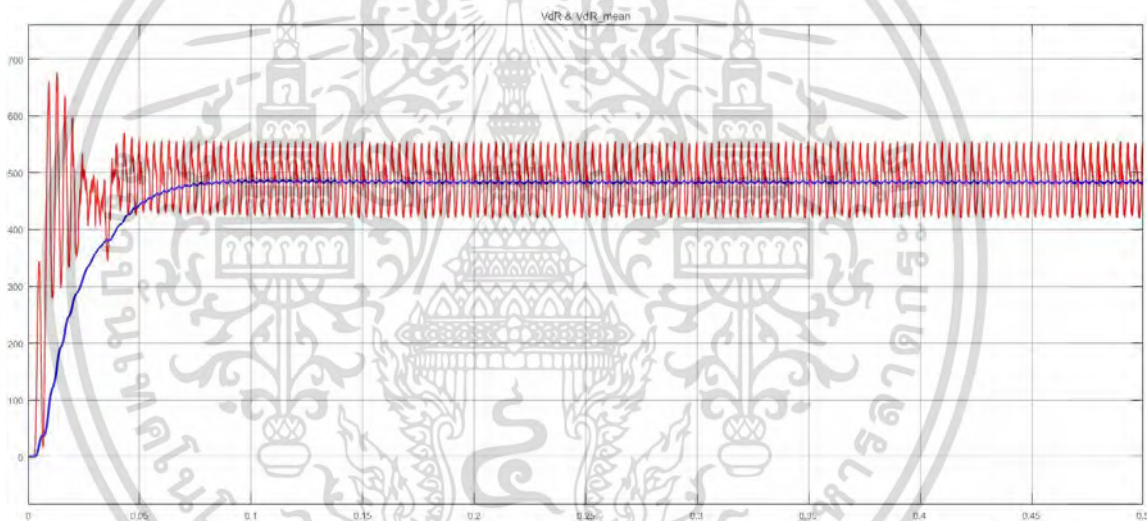
(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

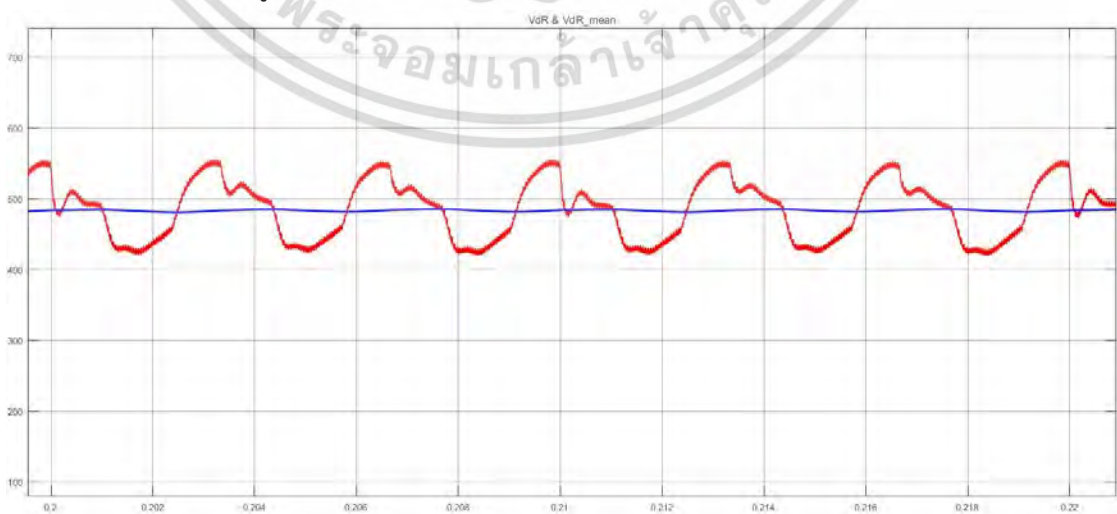


(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.12 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

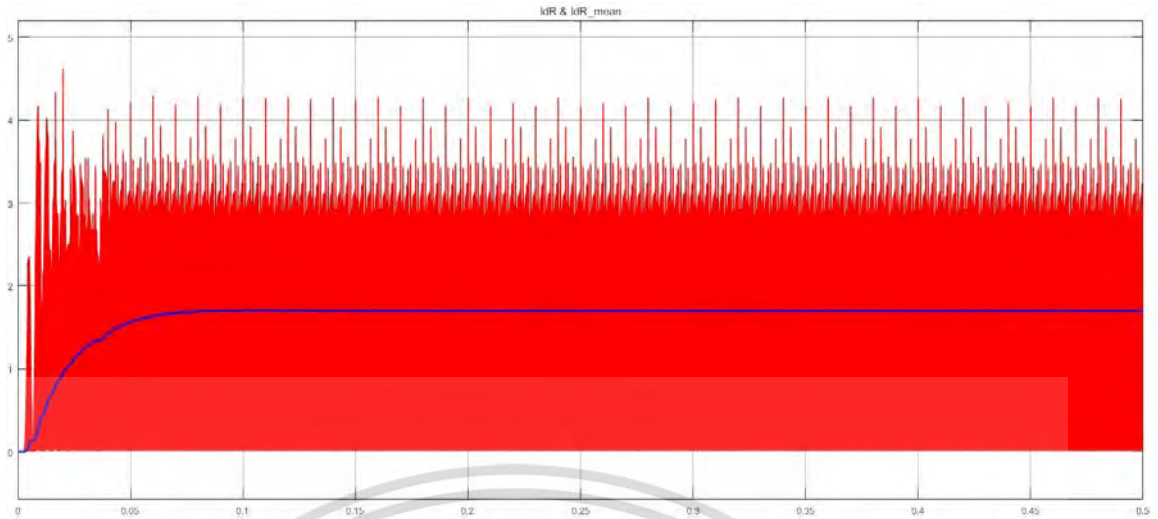


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

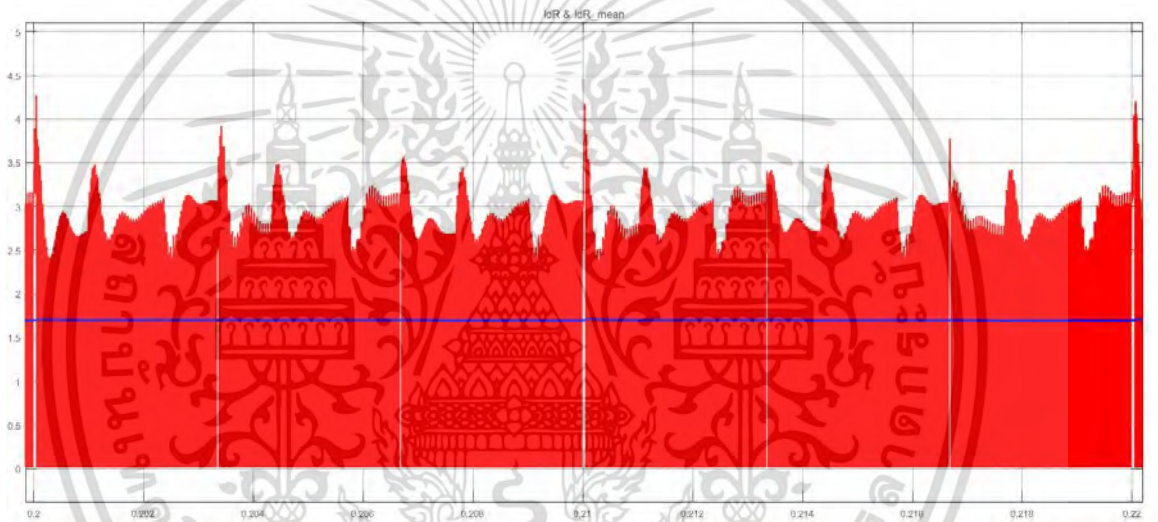


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

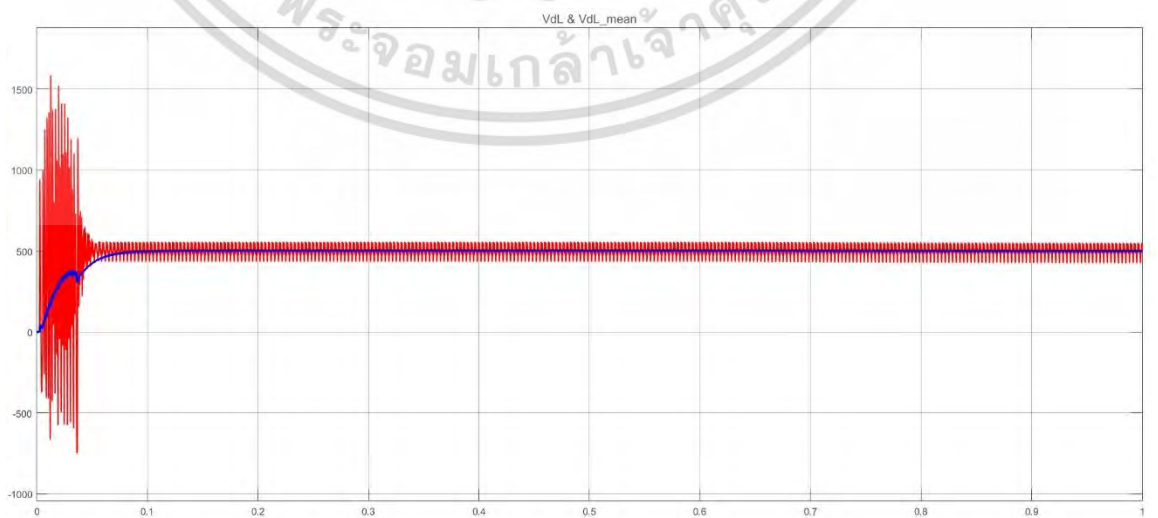


(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



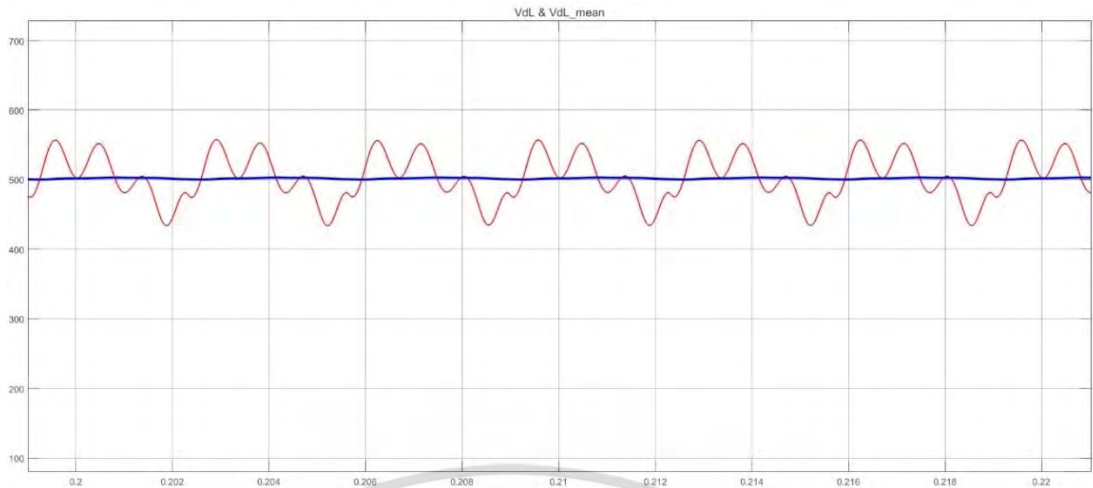
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.13 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

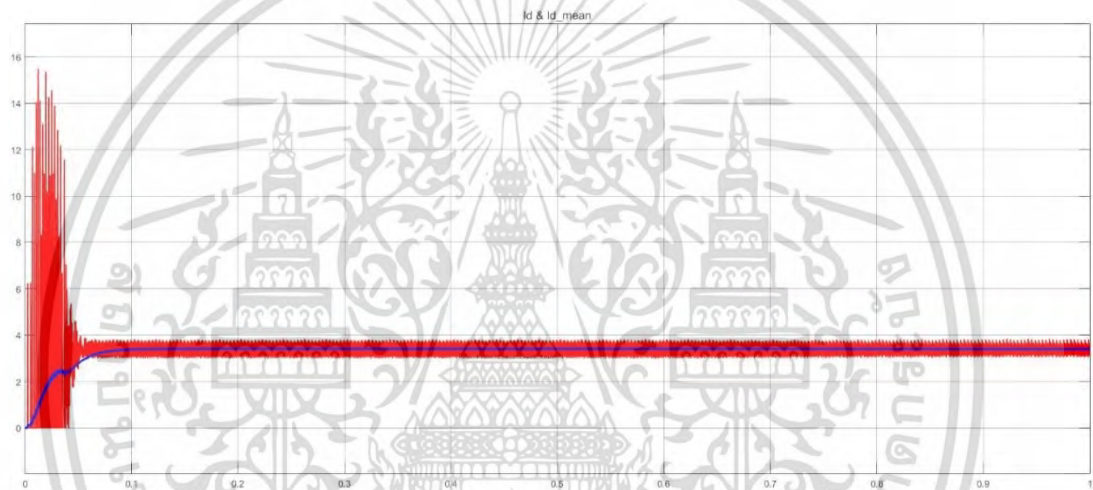


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

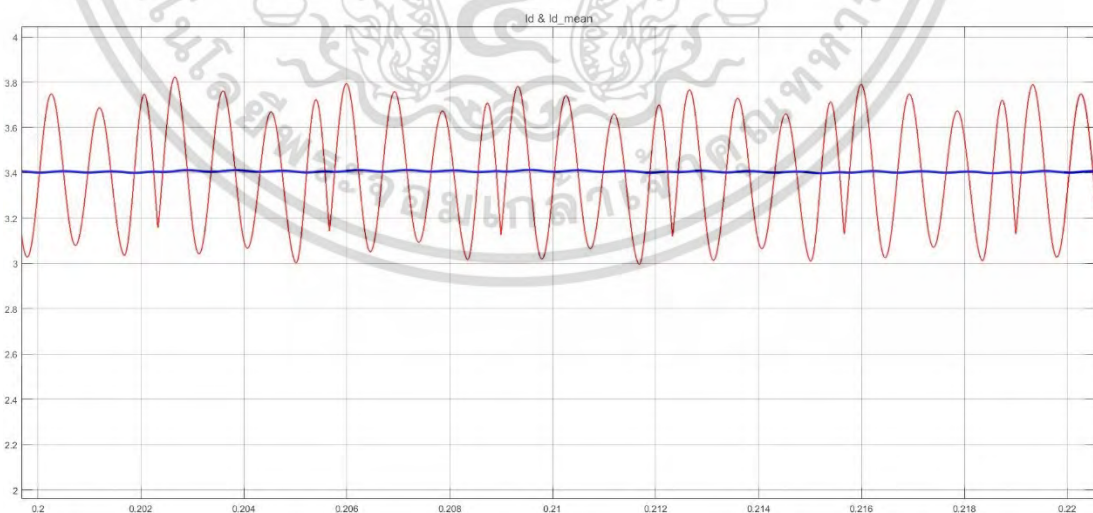
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขข้อกำหนดด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว



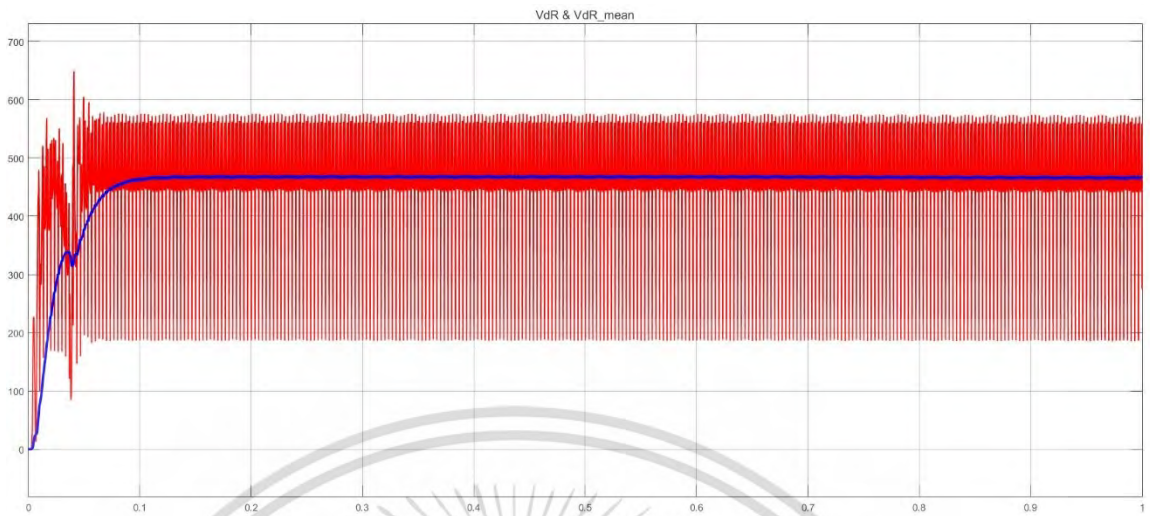
(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



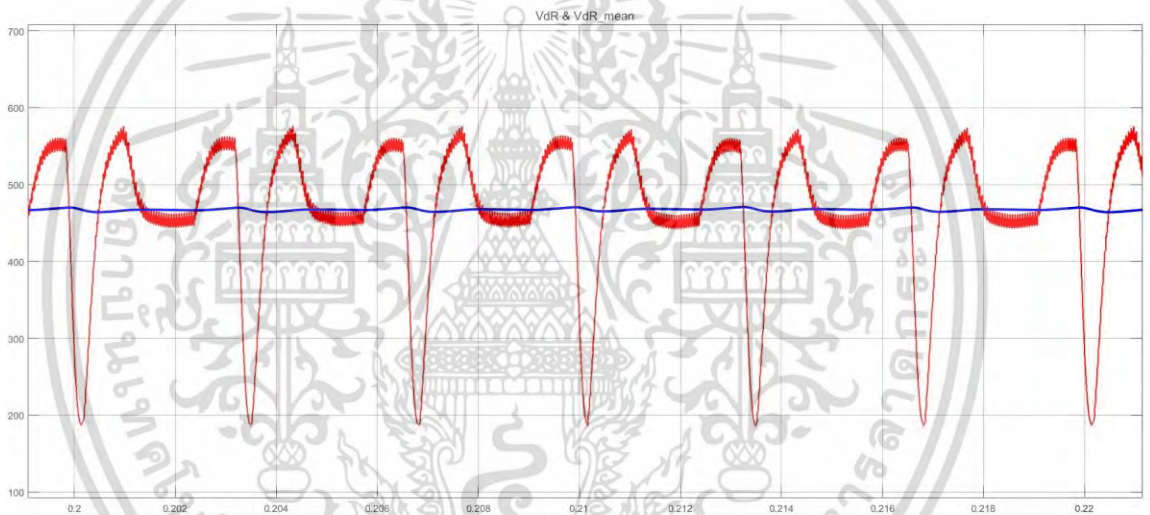
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

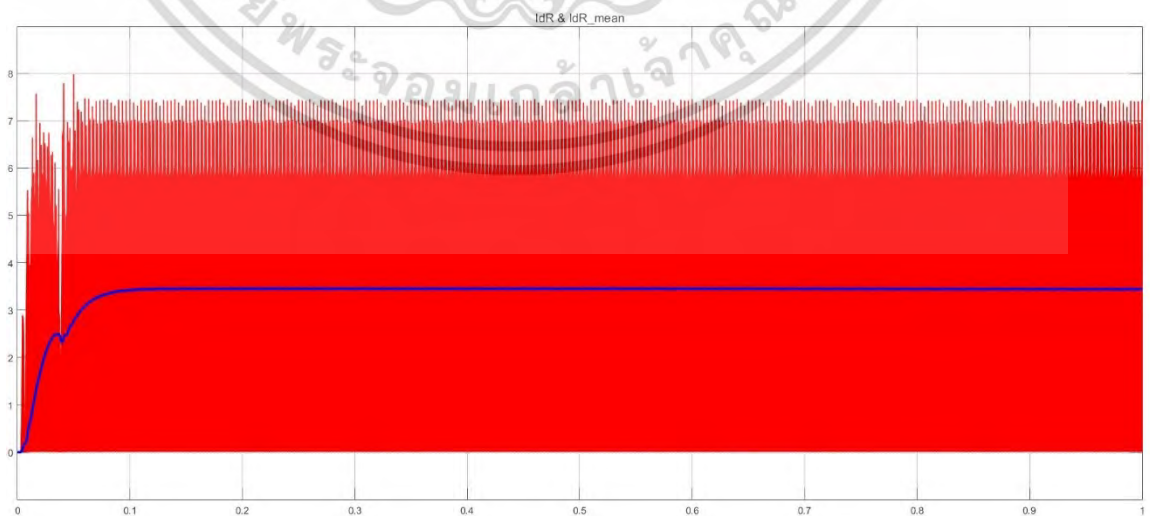
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

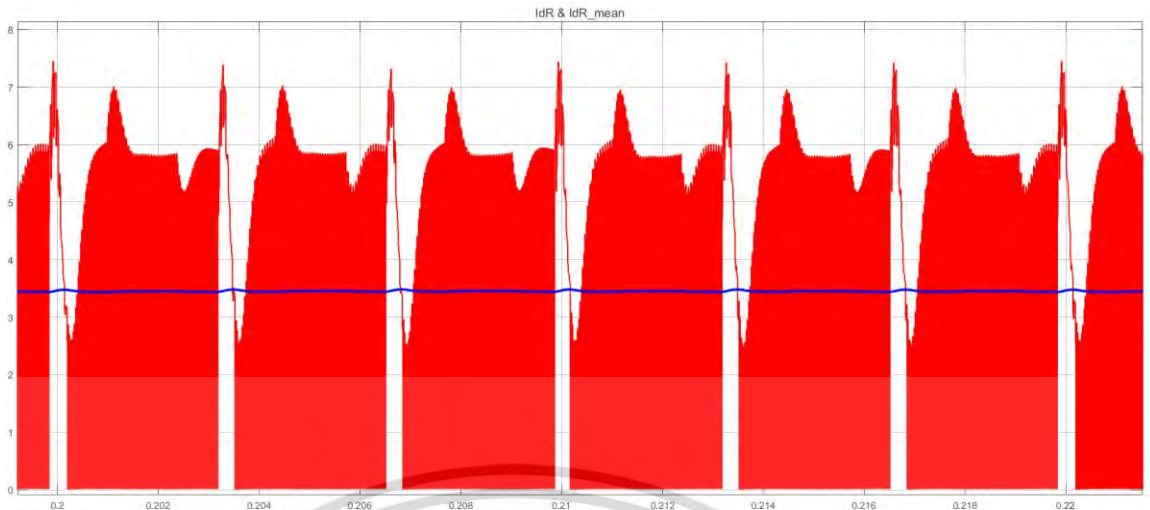


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว



(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดโหลด 750 W รูปคลื่นมีรีปเปิลและอัตราการแกว่งสูง แต่มีช่วงเวลาของการแกว่งน้อยกว่าพิกัดโหลดอื่น ที่พิกัดโหลด 1500 W รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งลดลง รวมทั้งมีค่ารีปเปิลของรูปคลื่นต่ำลง แต่มีช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสขาเข้าพบว่า ที่พิกัดโหลด 750 W รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งต่ำ แต่แกว่งรุนแรง ทำให้ให้รูปคลื่นมีค่ารีปเปิลสูง ที่พิกัดโหลด 1500 W พบว่ารูปคลื่นมีอัตราการแกว่งที่เพิ่มขึ้น แต่มีความรุนแรงของการแกว่งที่ลดลง ส่งผลให้รูปคลื่นมีขนาดของรีปเปิลต่ำลง

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

4.2.3 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันสายส่ง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 วัตต์ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 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 วัตต์กระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้ 1.484 A และที่แรงดันขาเข้าสายส่ง 500 V วัตต์กระแสไฟฟ้าของเฟส A ลดลงเหลือ 1.298 A เมื่อกระแสลดลงทำให้ความสูญเสียที่เกิดในสายส่งลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบต้องจ่ายลดลงด้วย โดยที่แรงดัน 450 V วัตต์กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้ 295.9 W และ 128.7 var ตามลำดับ และที่แรงดัน 500 V วัตต์กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเฟส A ได้ 278.2 W และ 50.13 var ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และเปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมสายส่งมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันด้านขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น 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 ตามลำดับและที่แรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1.698 A และ 816.7 W ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ปริมาณทางไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัดโหลด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด

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

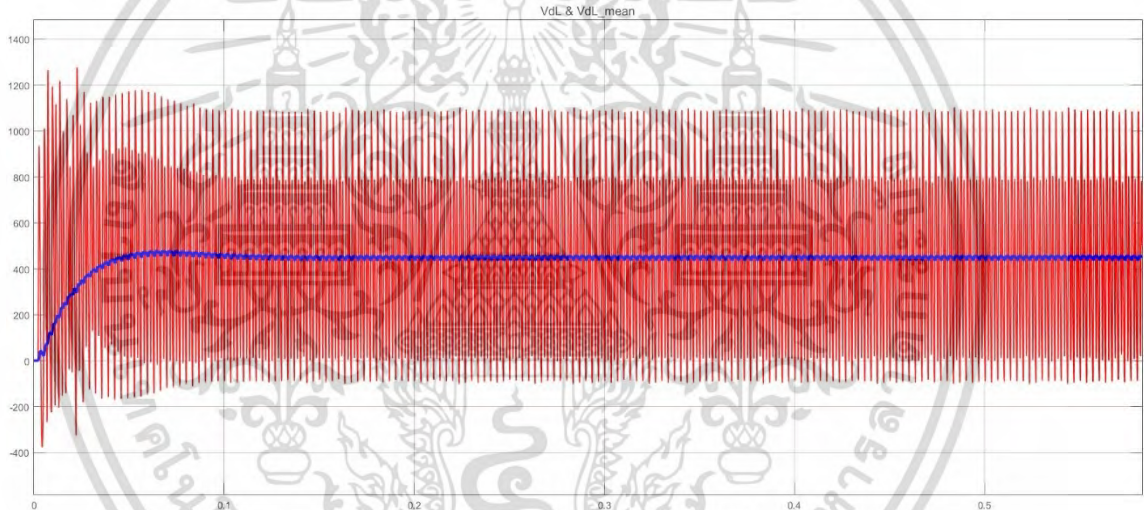
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากการจำลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน

พิกัดแรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ตำแหน่งA	ตำแหน่งB	ตำแหน่งC	ตำแหน่งD
450	886.8	850.0	819.4	747.3
500	835.5	827.5	816.7	744.7

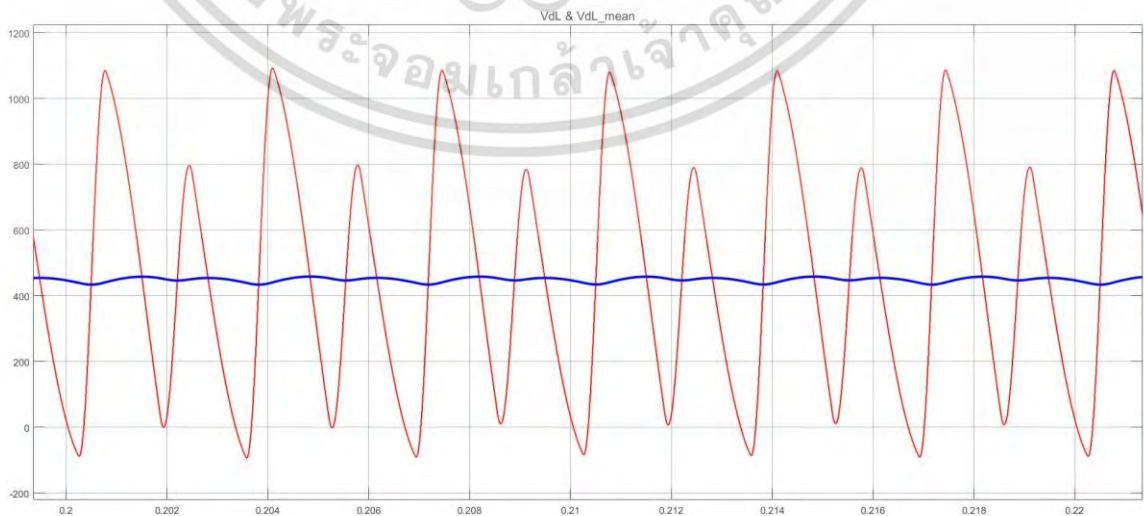
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

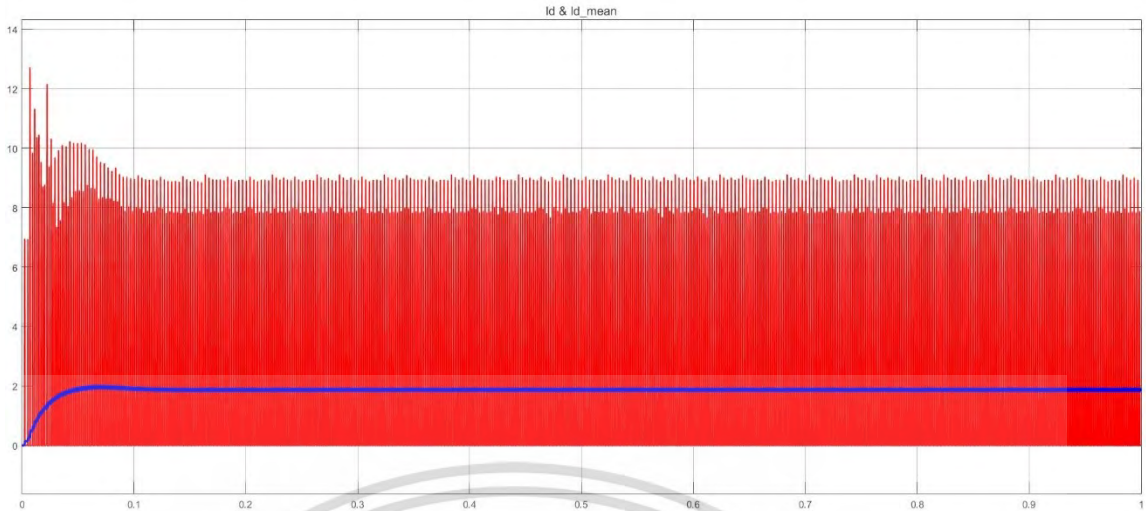


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

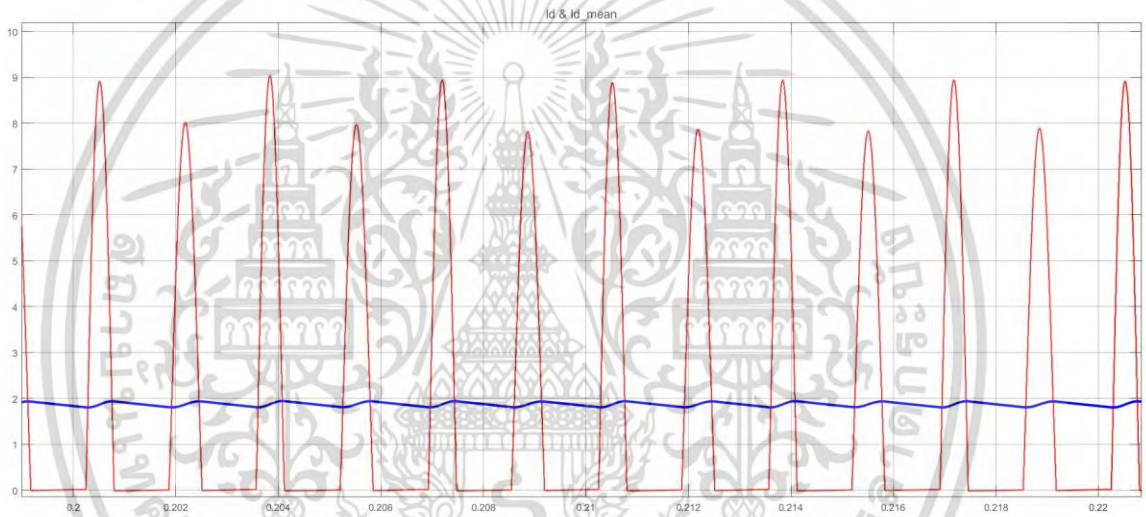


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

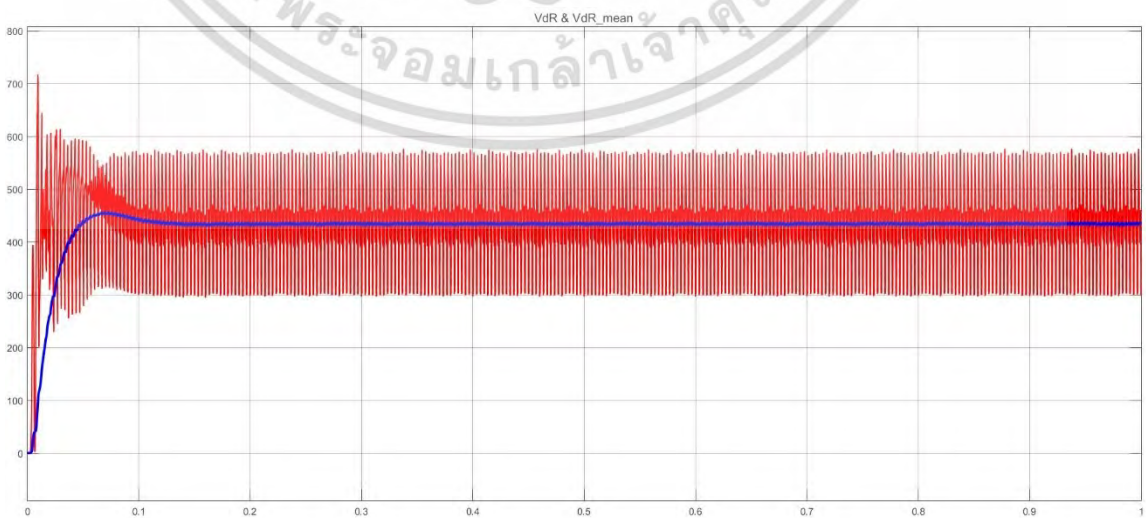


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



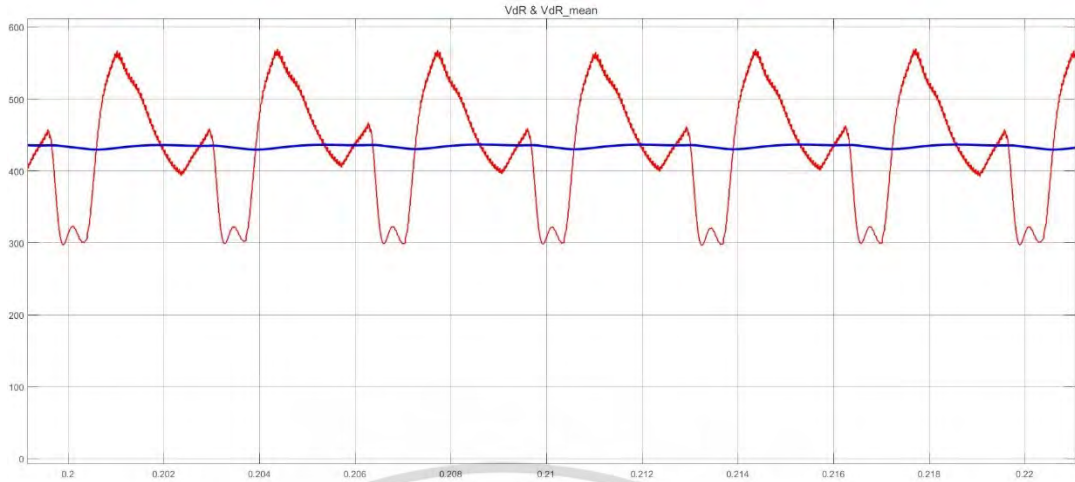
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.16 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

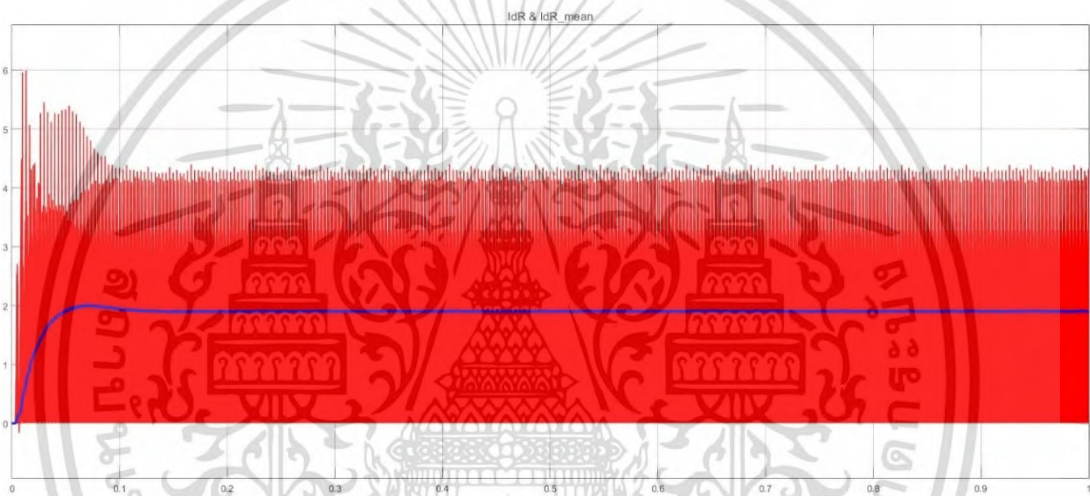


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

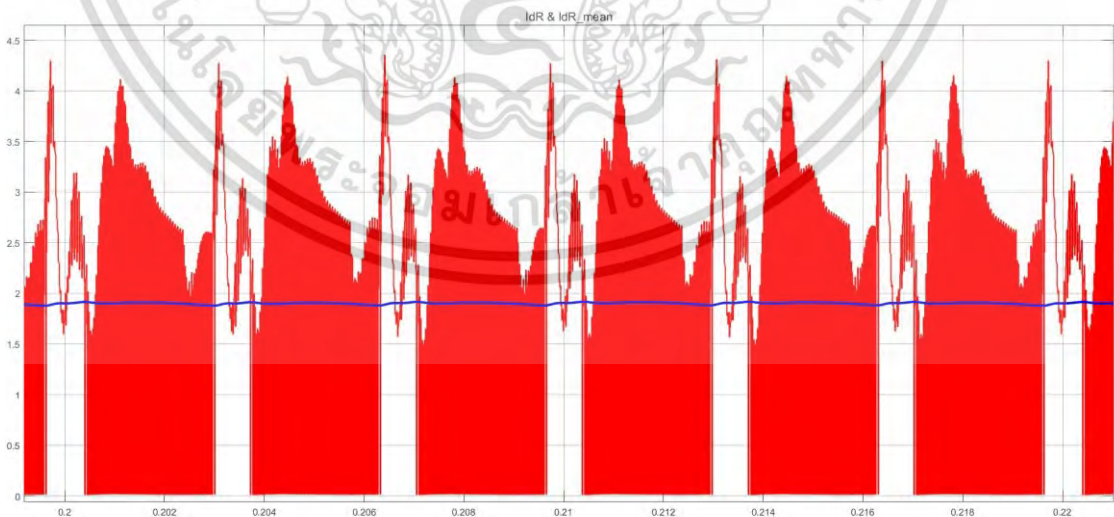
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นใบขออนุญาตดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว



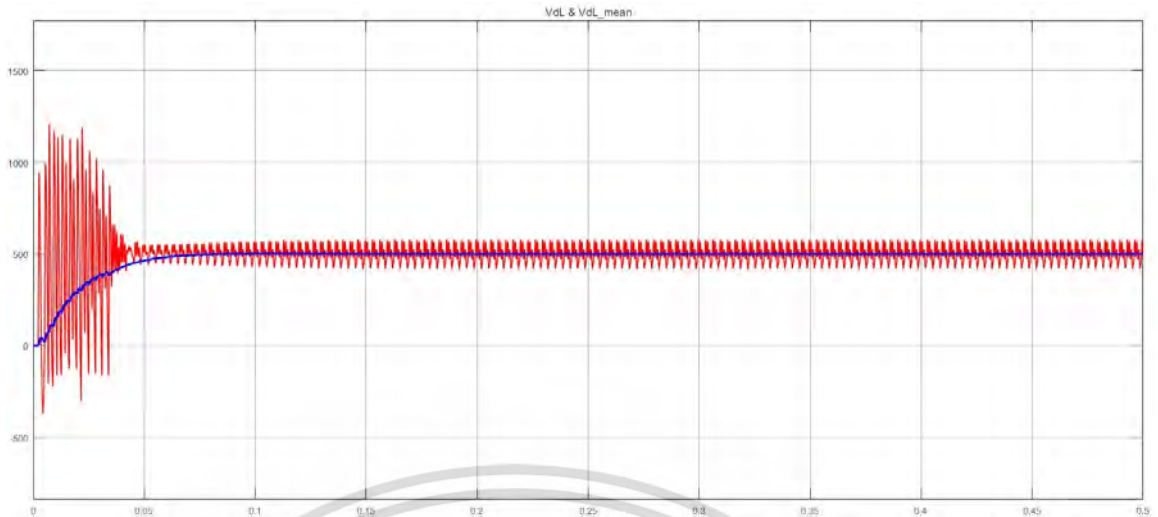
(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



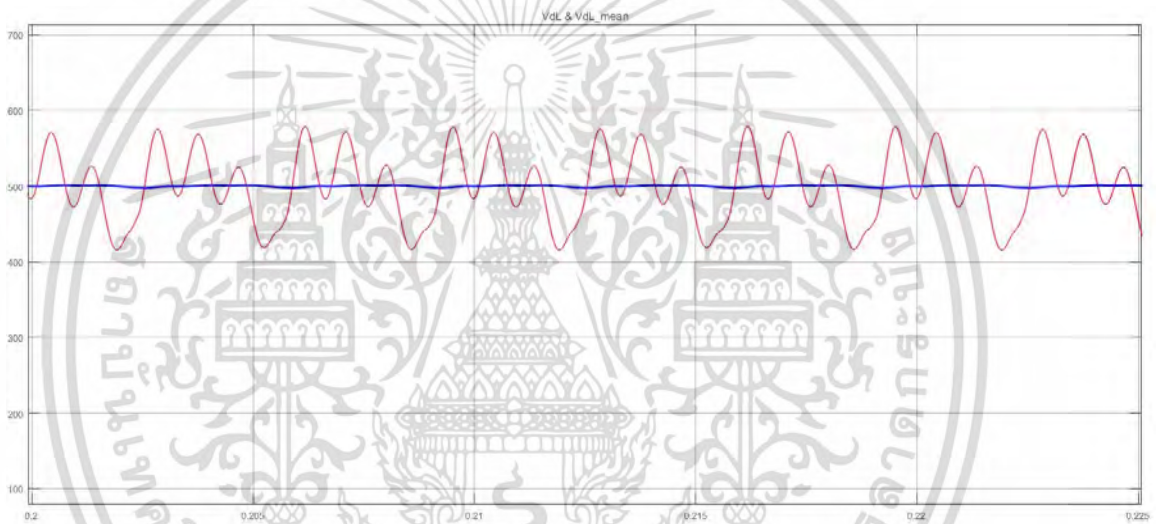
(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

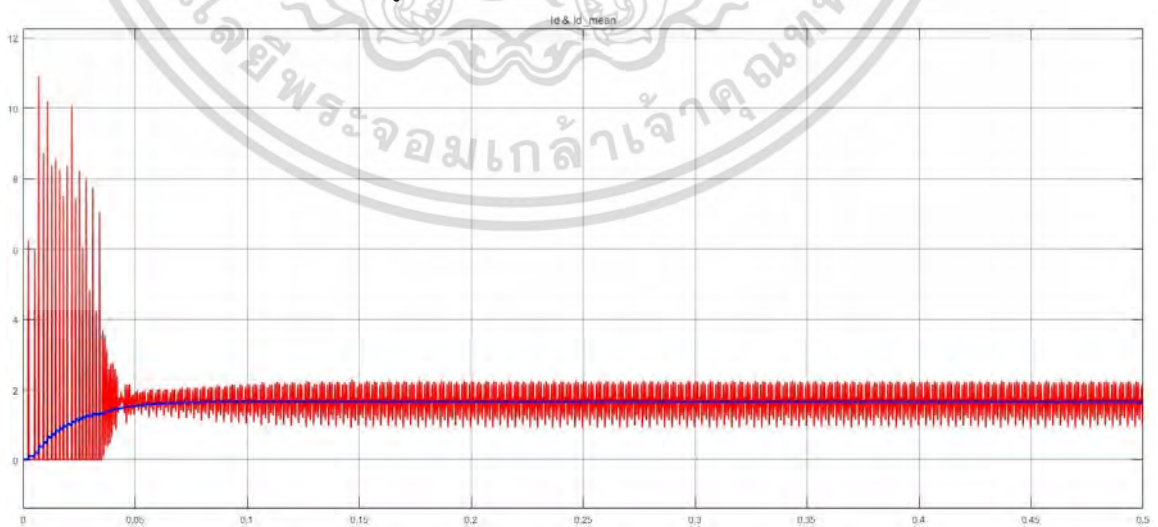
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

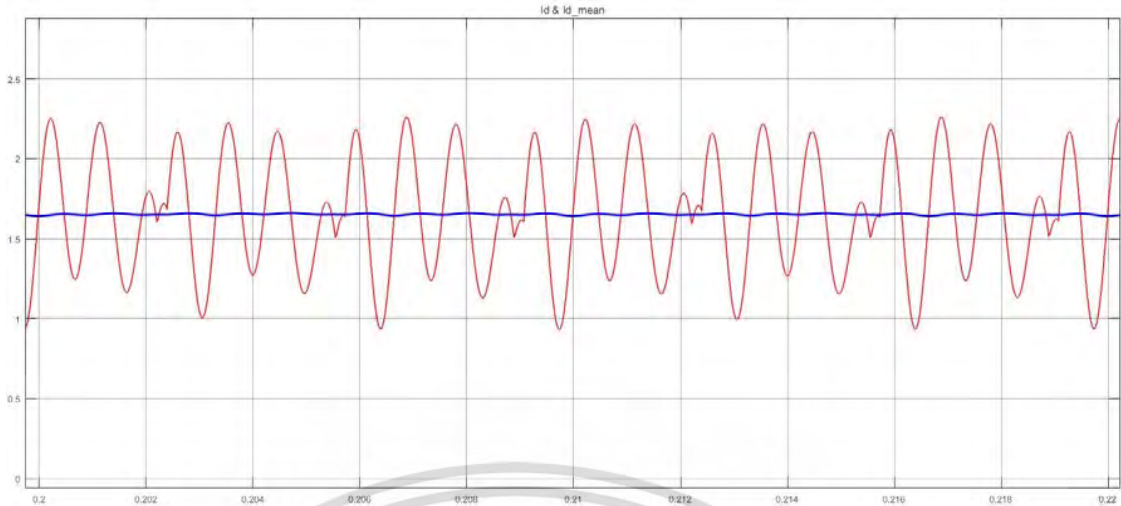


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว

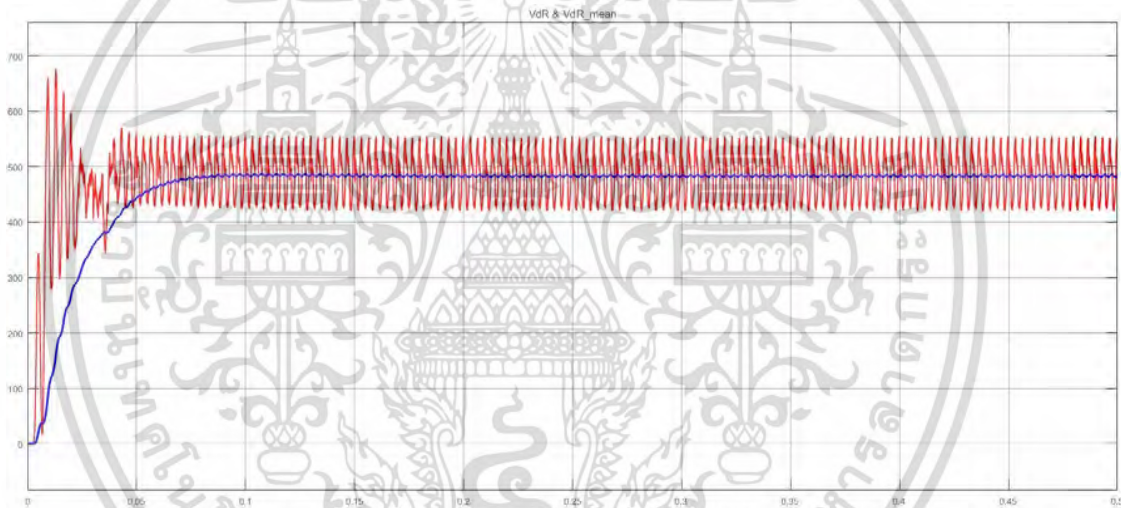


(ค) รูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

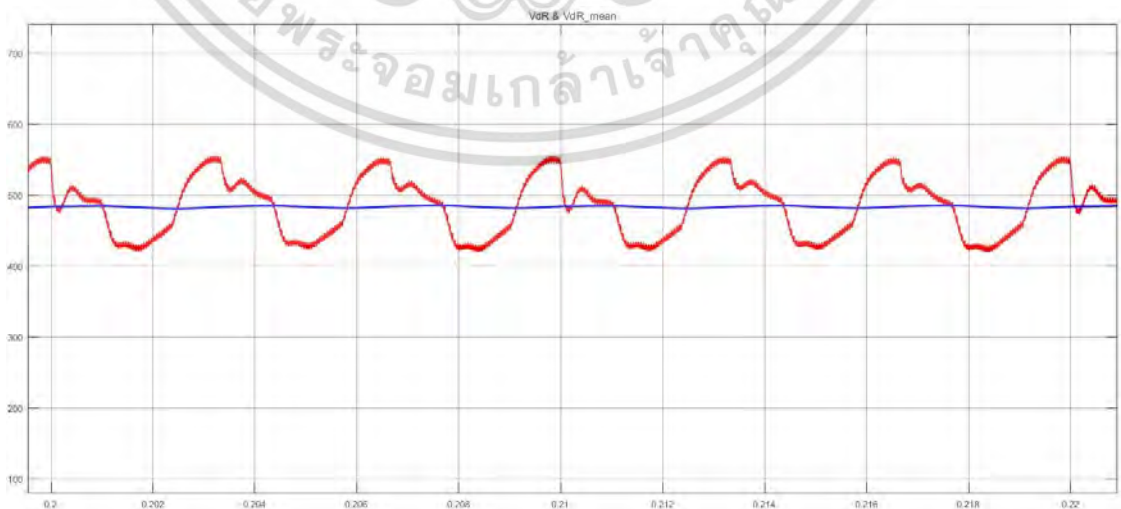
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาเข้าสายส่งที่สภาวะคงตัว
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

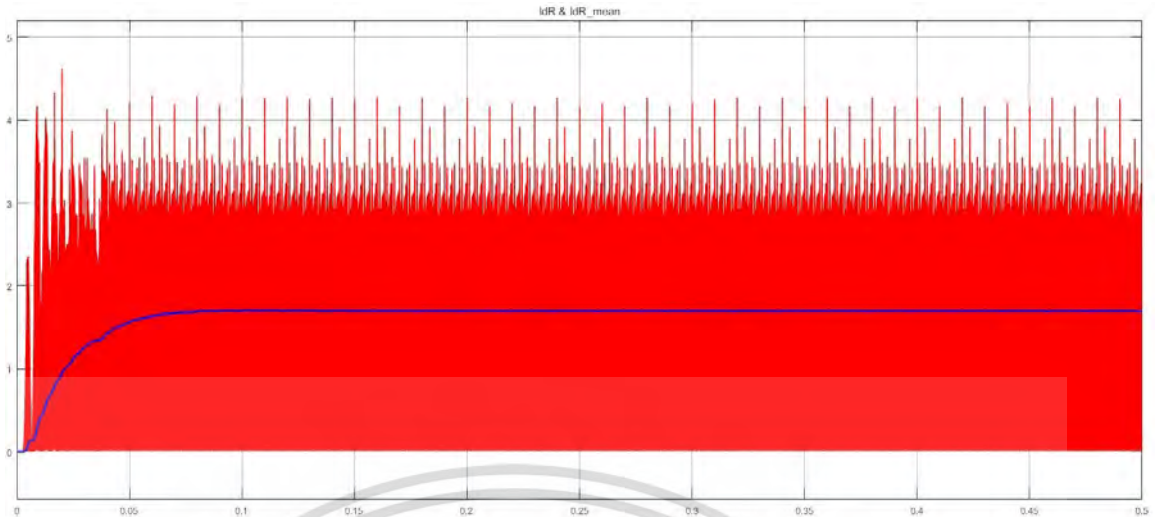


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)

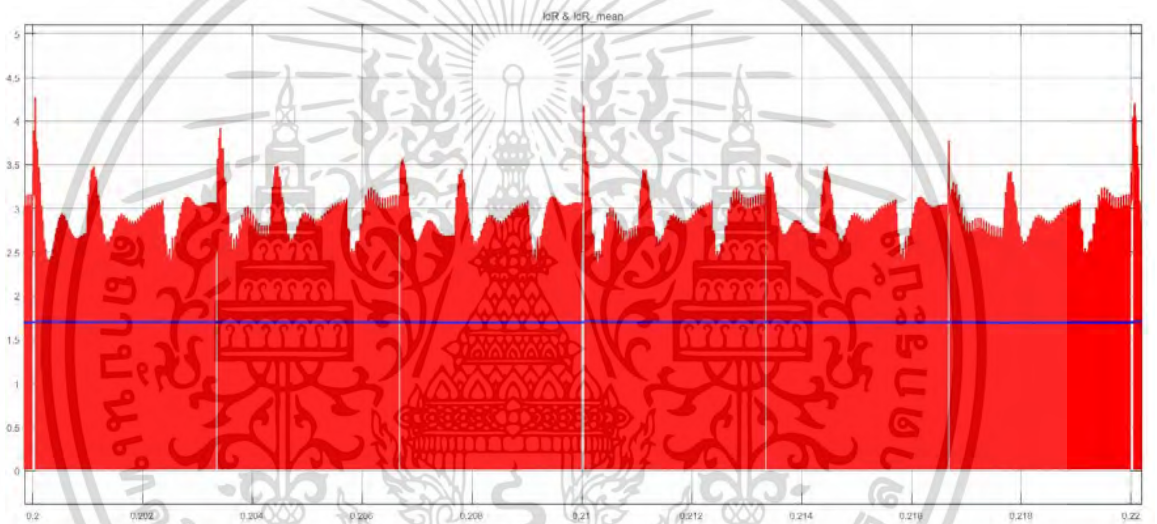


(ข) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่ง (สีแดง) และค่าเฉลี่ย (สีน้ำเงิน)



(ง) ภาพขยายรูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V มีการแกว่งที่รุนแรงและมีช่วงเวลาในการแกว่งที่มากกว่าส่งผลให้รีปเปิลสูงกว่า ที่พิกัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นแรงดันมีการแกว่งมีความรุนแรงน้อย ส่งผลให้รีปเปิลต่ำ แต่มีอัตราการแกว่งที่มากขึ้น และช่วงเวลาของการแกว่งลดลง เมื่อพิจารณา รูปคลื่นกระแสพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นมีการแกว่งมากส่งผลให้รีปเปิลสูง และมีช่วงเวลาของการแกว่งน้อย ที่พิกัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นมีความรุนแรงในการแกว่งที่ลดลงส่งผลให้คาร์ปเปิลต่ำ แต่ช่วงเวลาของการแกว่งเพิ่มขึ้น

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งกระแสตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน พิจารณารูปคลื่นแรงดันพบว่า ที่พิกัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นมีอัตราการแกว่งที่น้อยและมีความรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยทำให้ค่าริบเปิลของรูปคลื่นต่ำ และเมื่อปรับพิคัดเป็น 500 V พบว่าอัตราการแกว่งมีค่าเพิ่มขึ้น และการแกว่งมีความรุนแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าริบเปิลสูงขึ้นมาก เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส ที่พิคัดแรงดัน 450 V รูปคลื่นกระแสมีช่วงเวลาการแกว่งมาก ที่พิคัดแรงดัน 500 V รูปคลื่นกระแสมีช่วงเวลาของการแกว่งลดลง

4.3 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองด้วยชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่สร้างขึ้น ทดลองการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของสายส่ง ความยาวของสายส่งและพิคัดโหลด โดยกำหนดแรงดันที่เข้าเรกติไฟเออร์ 380 V และแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ 220 V

4.3.1 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่ง

กำหนดระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิคัด 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 วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์

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 วัดค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ได้จาก 1.96 A เพิ่มขึ้นเป็น 2.44 A แต่เมื่อเพิ่มระยะทางเป็น 600 กิโลเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A ที่วัดได้มีค่าลดลงมาที่ 2.16 A ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกัน นั่นคือเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากระยะ 150 กิโลเมตรเป็น 300 กิโลเมตรวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส 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
ก กำลังไฟฟ้าขาเข้าสายส่ง	W	700.42	750.00	801.12
ก กำลังไฟฟ้าขาออกสายส่ง	W	693.42	734.85	771.52

จากตารางที่ 4.14 ค่าของปริมาณทางไฟฟ้าที่วัดบริเวณขาเข้านั้นสอดคล้องกับตารางที่ 4.10 นั่นคือแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีปริมาณคงเดิมที่ประมาณ 500 V แต่กระแสไฟฟ้าและก กำลังไฟฟ้าจริงขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 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 และก กำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า โดยที่ 150 กิโลเมตรวัดค่าก กำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 693.42 W ต่อมาที่ระยะ 300 กิโลเมตรวัดค่าก กำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 734.85 W และที่ระยะ 600 กิโลเมตรวัดค่าก กำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 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 ส่วนกระแสและกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหนดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 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

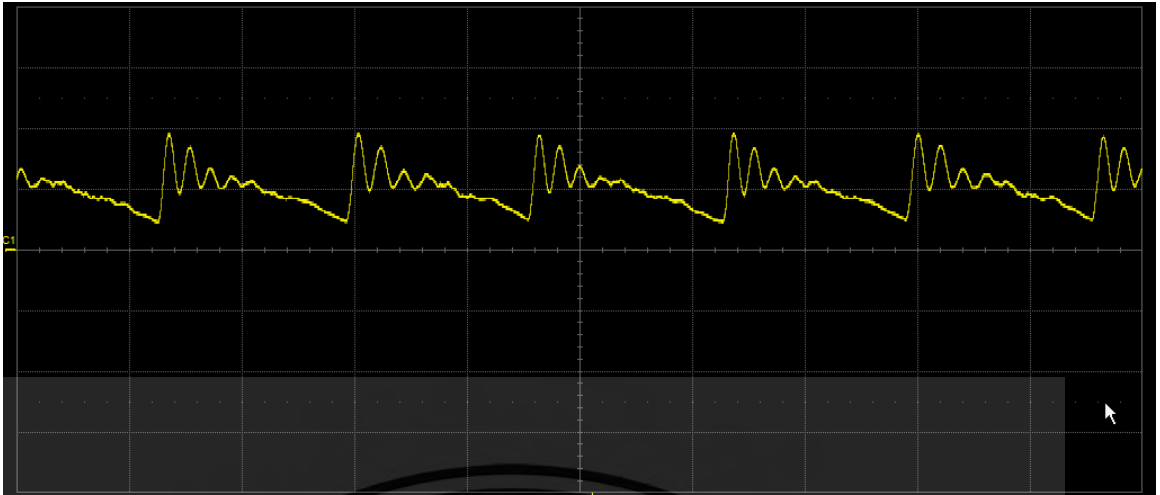
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตาแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนระยะสายส่ง

ระยะสายส่ง (km)	ก ลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ต าแหน่งA	ต าแหน่งB	ต าแหน่งC	ต าแหน่งD
150	931	700.42	693.42	649.97
300	959	750.00	734.85	704.42
600	950	801.12	771.52	704.32

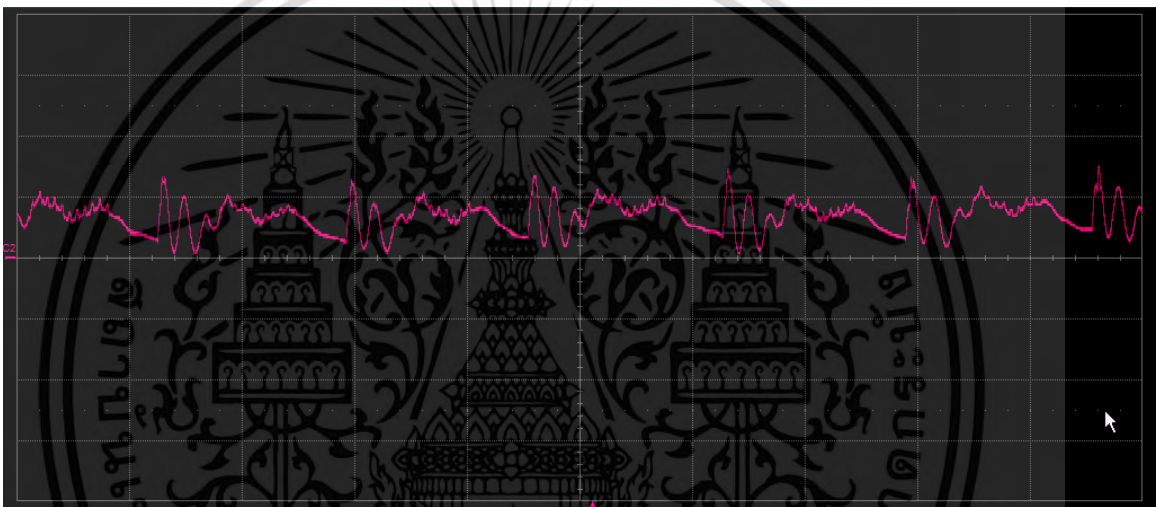
จากตารางที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในเรกติไฟเออร์ (ระหว่างตาแหน่ง A และ B) มีค่าลดลงเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 230.58 209.00 และ 148.88 W ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่ง (ระหว่างตาแหน่ง B และ C) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะสายส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.00 15.15 และ 29.6 W ตามลำดับ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

เมื่อเทียบแนวโน้มของผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 กับผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งทั้งตาราง แต่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงทั้งขาเข้าและขาออกของทั้งตารางกลับมีแนวโน้มตรงกันข้ามกัน นั่นคือแนวโน้มของผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงลดลงเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.14 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ซึ่งจากการเปรียบเทียบดังกล่าวแล้วเกิดความแตกต่างขึ้น สาเหตุอาจเกิดจากการสร้างชุดทดลองขึ้นมาตรงส่วนของการจำลองสายส่งนั้น มีค่าความต้านทานแฝงอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแต่ละค่าอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมและแก้ไขไม่ได้ ทำให้ค่าความต้านทานในสายส่งที่ระยะต่าง ๆ เกินค่าที่คำนวณออกแบบไว้ในตอนแรก ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนในการทดลอง จึงอาจต้องมีการปรับปรุงชุดทดลองนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในภายภาคหน้า

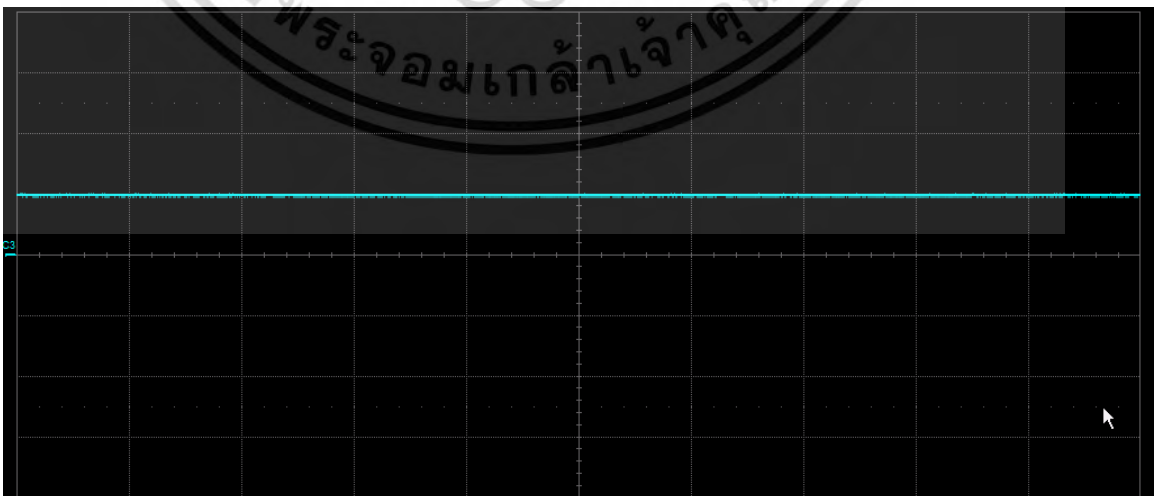


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



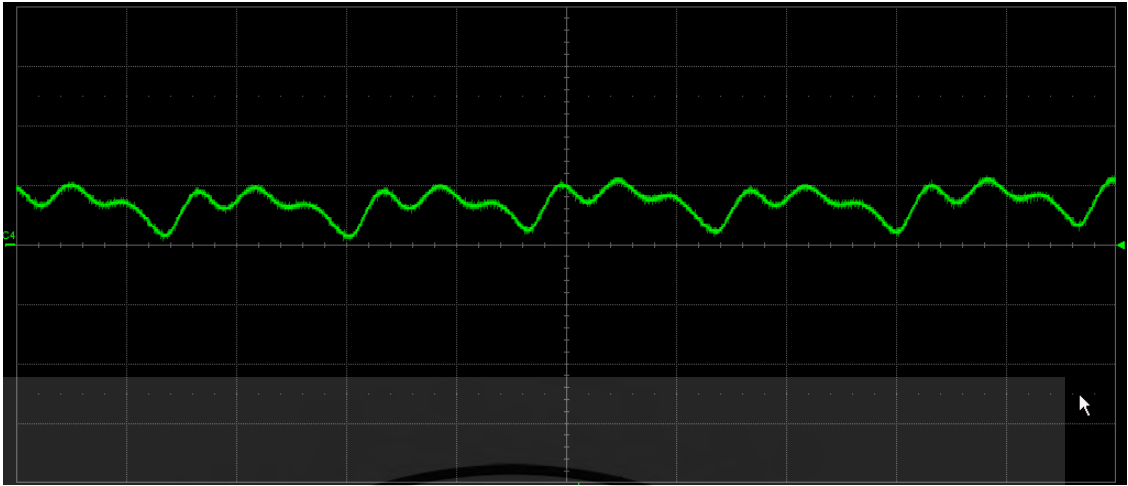
(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร



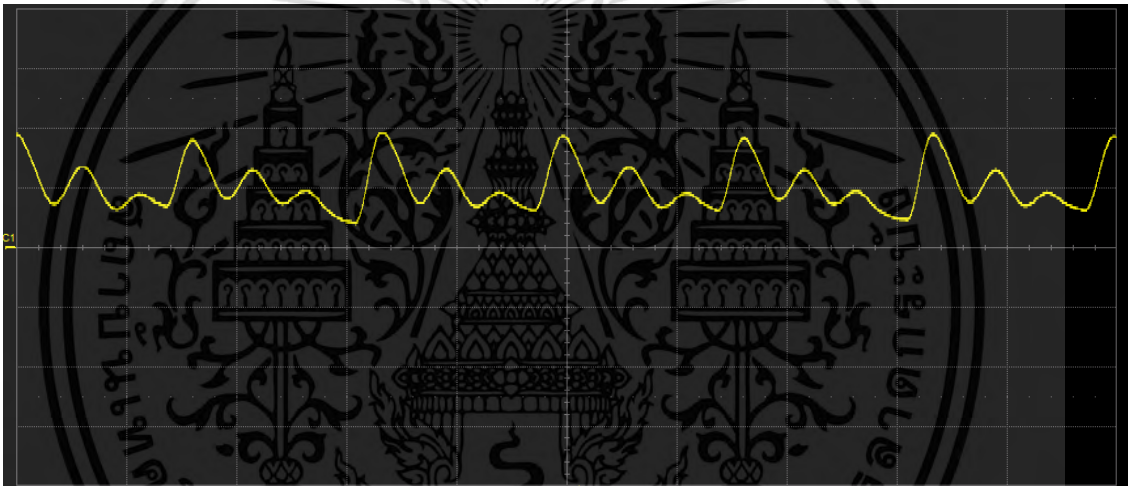
(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

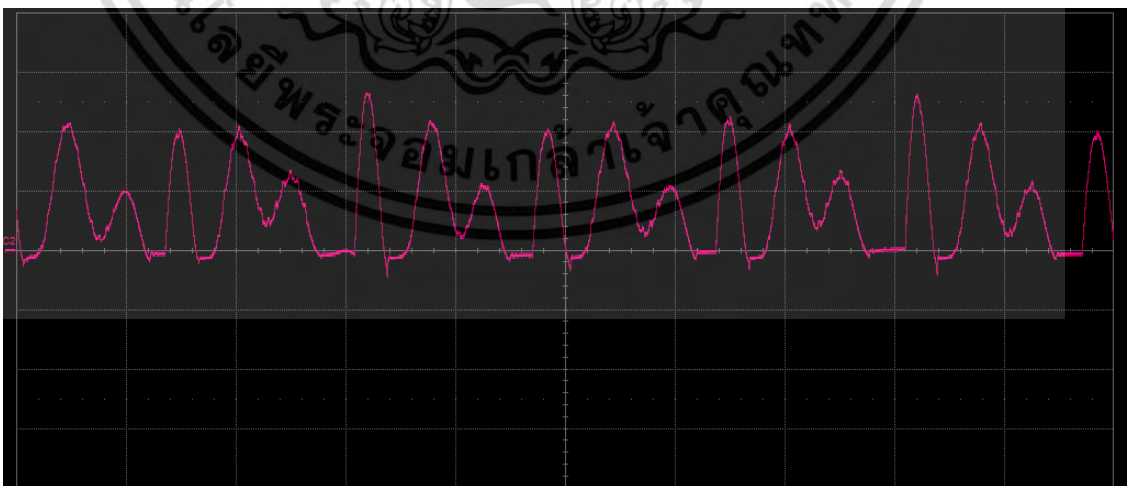


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 150 กิโลเมตร



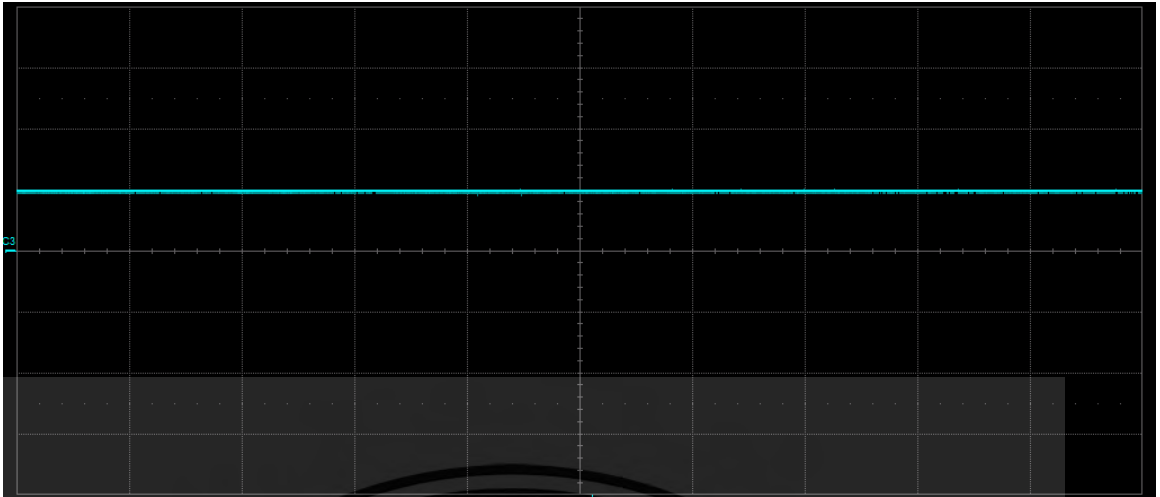
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



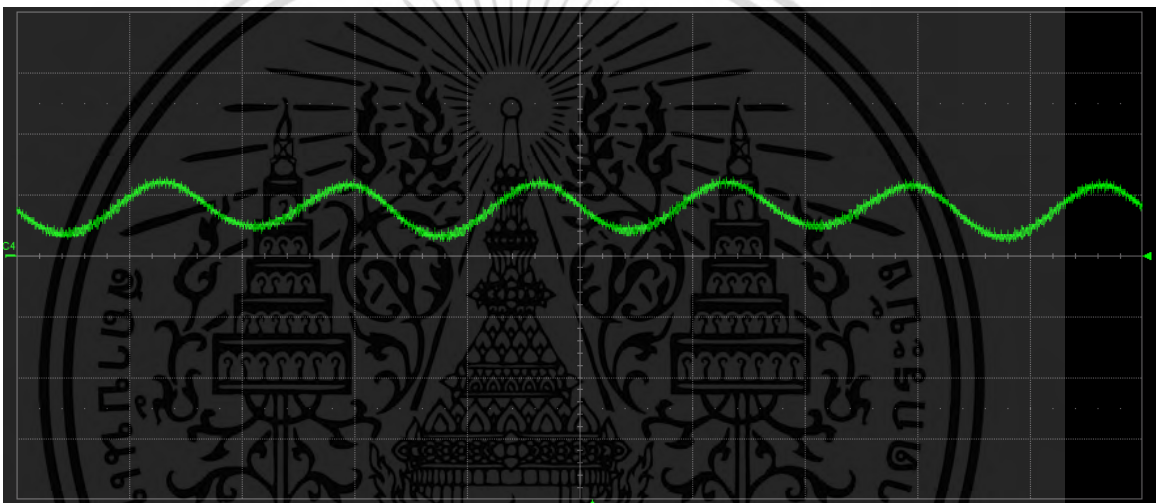
(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.22 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



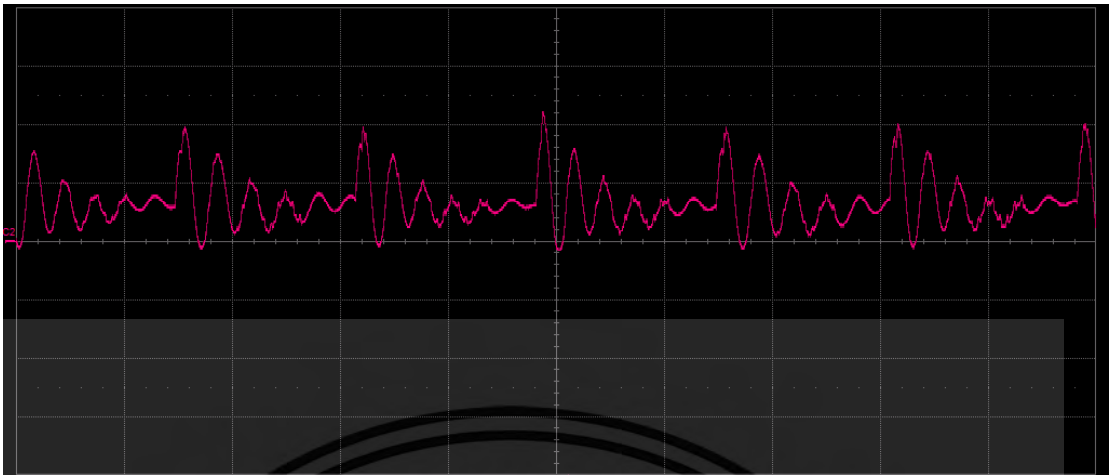
(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 300 กิโลเมตร



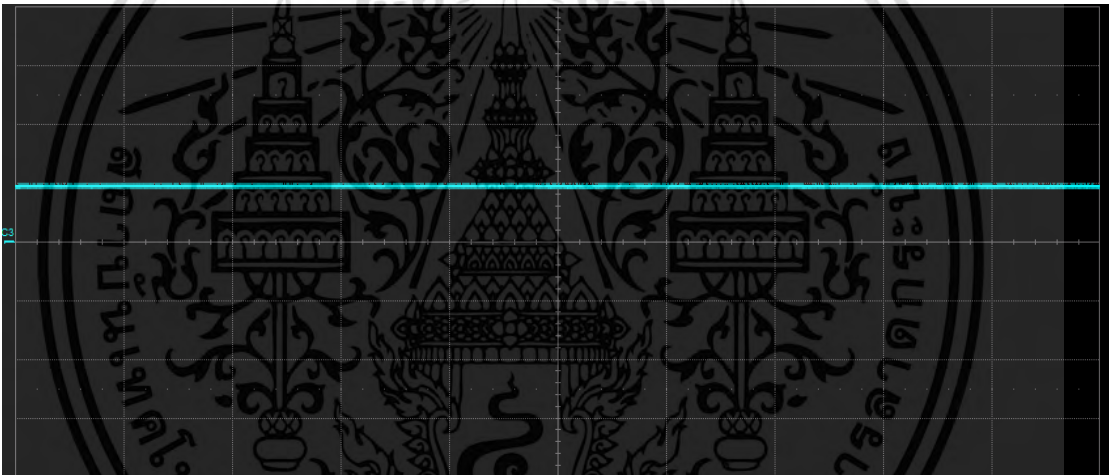
(ค) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

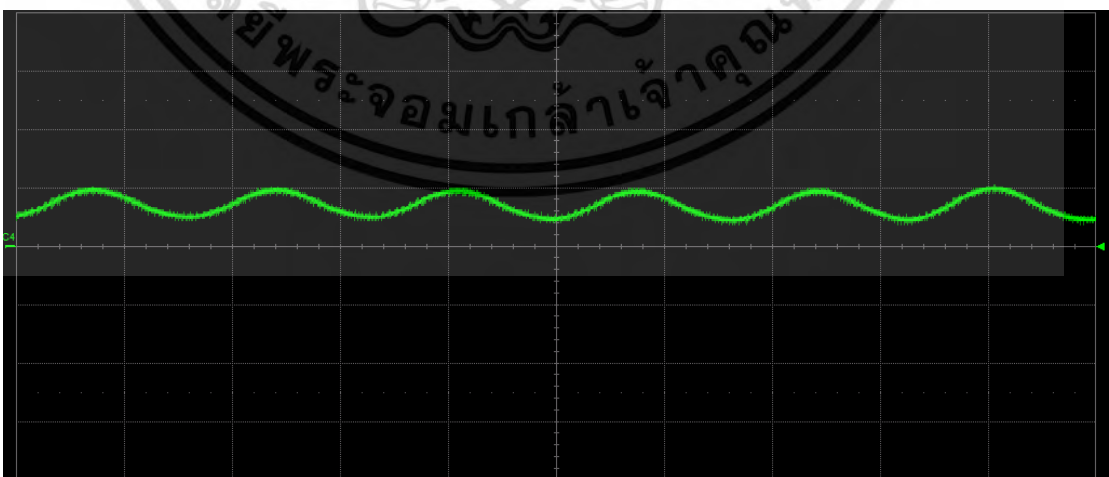


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.24 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 750 W 600 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคลื่นกระแสและแรงดันขาเข้าสายส่งของแต่ละความยาวพบว่า รูปคลื่นแรงดันขาเข้าที่ความยาวสายส่ง 150 กิโลเมตร มีการแกว่งจนวนครั้งและความรุนแรงน้อยที่สุดและหายไปเร็วที่สุด เมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่งเป็น 300 กิโลเมตร การแกว่งมีความรุนแรงมากขึ้นและหายไปช้าที่สุด และเมื่อเปลี่ยนความยาวสายส่งเป็น 600 กิโลเมตร พบว่าการแกว่งมีความรุนแรงน้อยกว่าระยะ 300 กิโลเมตร แต่รุนแรงกว่าและหายไปช้ากว่าที่ระยะ 150 กิโลเมตร เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสพบว่า มีแนวโน้มการแกว่งเช่นเดียวกับรูปคลื่นแรงดันขาเข้าสายส่ง แต่มีริบเปิดสูงขึ้นเมื่อปรับระยะสายส่งมากขึ้น

จากรูปคลื่นกระแสและแรงดันหลังขาออกสายส่งของแต่ละความยาวพบว่า รูปคลื่นแรงดันออกจากสายส่งของระยะ 150 300 และ 600 กิโลเมตร มีความเรียบเหมือนกัน และเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสออกจากสายส่ง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะสายส่งรูปคลื่นกระแสมีความเรียบมากขึ้น เนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำในสายส่งที่เพิ่มขึ้น

4.3.2 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
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	163	311	603
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	171	314	605
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	170	318	605
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	134	283	556
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	128	270	529
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	118	262	523

ตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะที่เพิ่มขึ้น 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 วัดค่าก กำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ได้จาก 291 VA เพิ่มขึ้นเป็น 486 VA และเมื่อเพิ่มพิกัดโหลดเป็น 1500 W ค่าก กำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟส A ที่วัดได้มีค่าเป็น 867 VA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ส่วนกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าขาเข้า และกำลังไฟฟ้าจริงขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิกัดโหลดในการส่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้บริเวณขาเข้า โดยที่โหลดพิกัด 300 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 243.6 W ต่อมาที่โหลดพิกัด 750 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 671.3 W และที่โหลดพิกัด 1500 W วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกได้เท่ากับ 1434.37 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

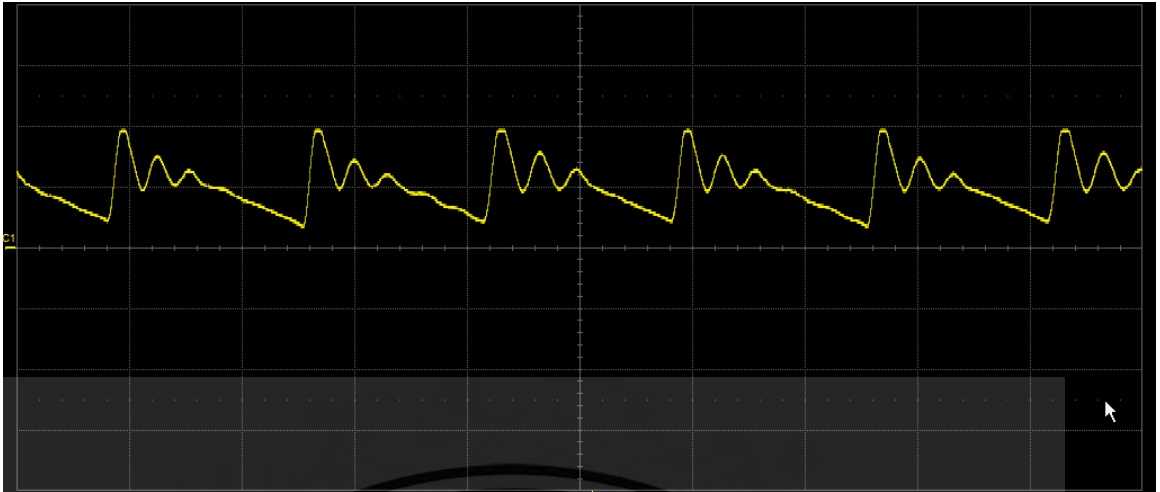
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลด

พิกัดโหลด (W)	ก กำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ต าแห่งA	ต าแห่งB	ต าแห่งC	ต าแห่งD
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

เมื่อเทียบแนวโน้มของผลการทดลองจากตารางที่ 4.6 กับผลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งทั้งตาราง แต่ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงทั้งขาเข้าและขาออกของทั้งสองตารางมีค่าไม่เหมือนกัน เนื่องจากการทดลองกระแสขาเข้าและขาออกนั้นมีค่าเท่ากัน ส่วนจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมกระแสขาออกจะมากกว่าขาเข้าเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์แฝงของระบบและผลของตัวเก็บประจุ ส่วนกำลังไฟฟ้าในสายส่งนั้นแตกต่างกันเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุในระบบจำลองที่ ทำให้กระแสมีค่าสูงขึ้น ทำให้ กำลังไฟฟ้าในสายส่งสูงขึ้น แต่พารามิเตอร์แฝงของระบบจำลองนั้นมีผลน้อย ทำให้ที่โหลด 300 W จากตารางที่ 4.6 ก กำลังไฟฟ้าก่อนเข้าสายส่งมีค่าน้อยกว่า กำลังไฟฟ้าที่ออกสายส่ง แต่ในส่วนของตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์แฝงมีผลค่อนข้างมากทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้ในสายส่งมีน้อยกว่า 300 W ส่วนในกรณีโหลดพิกัด 750 W และ 1500 W ของระบบจำลอง ก กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าน้อยกว่า กำลังไฟฟ้าขาเข้าเนื่องจากผลของกระแสที่มีค่ามากขึ้นค่อนข้างมากส่งผล ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

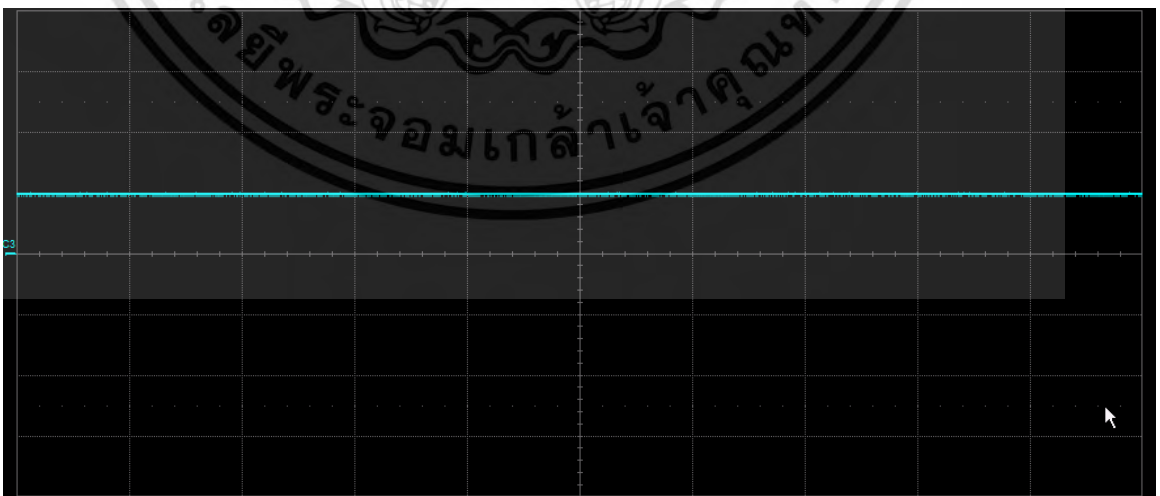


(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



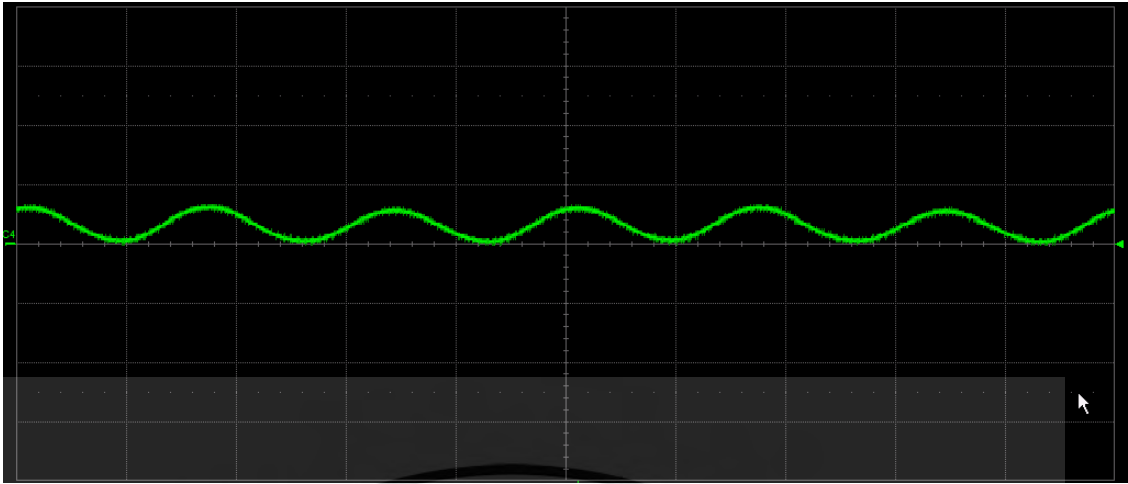
(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W



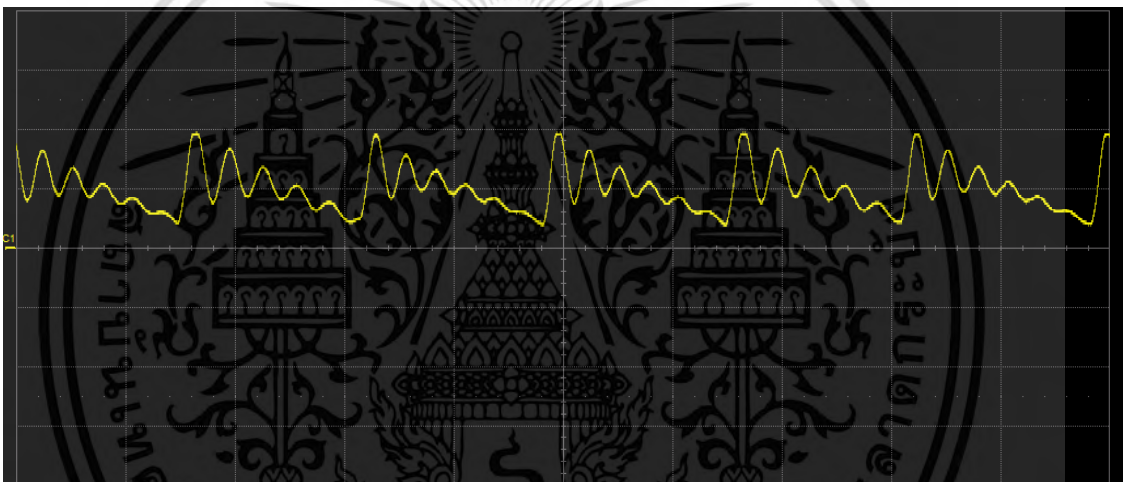
(ค) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

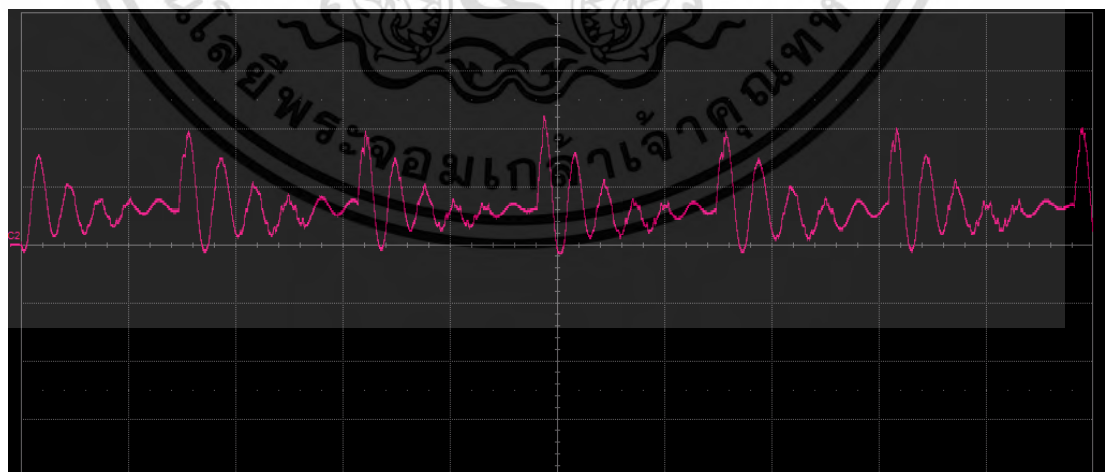


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.27 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 300 W



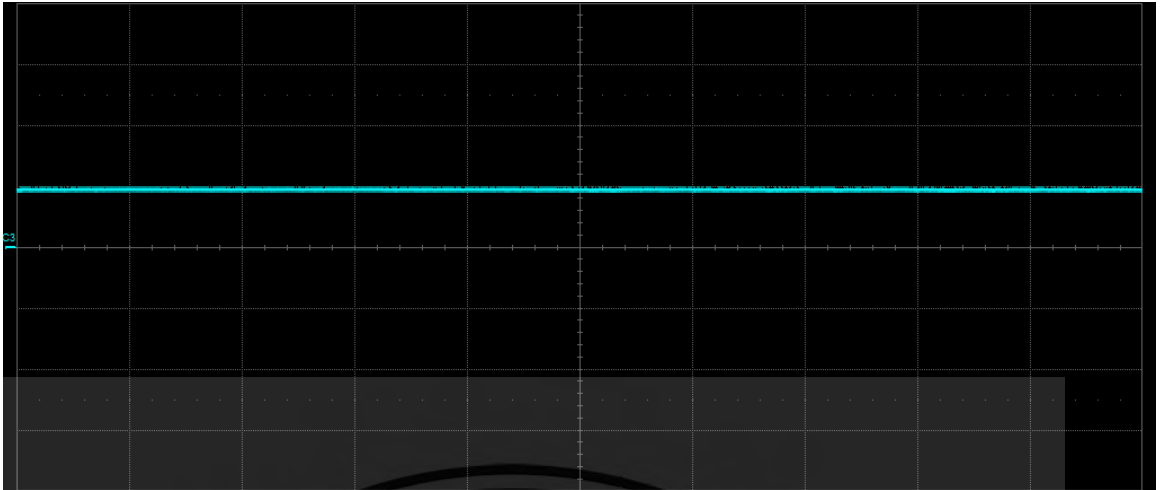
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



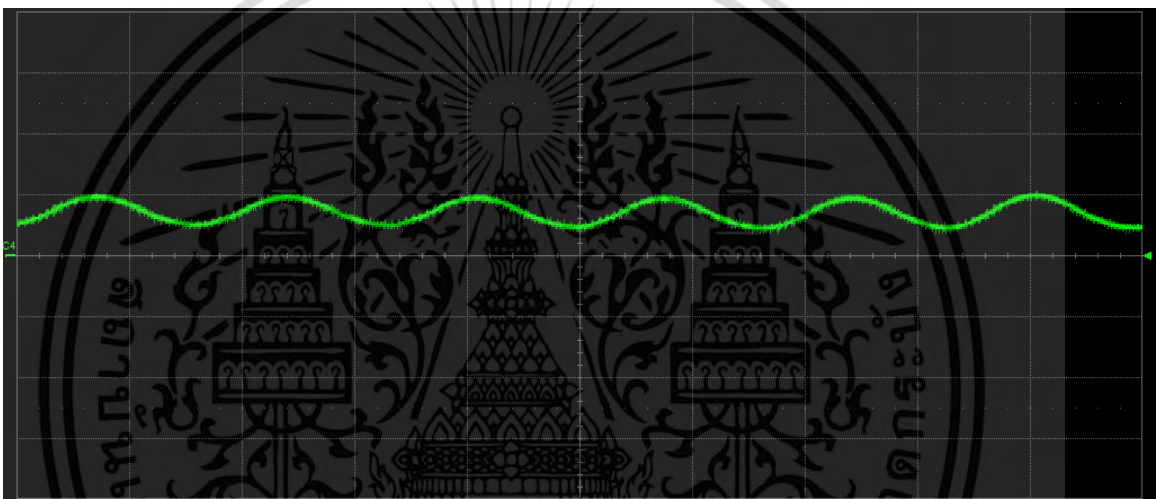
(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.28 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

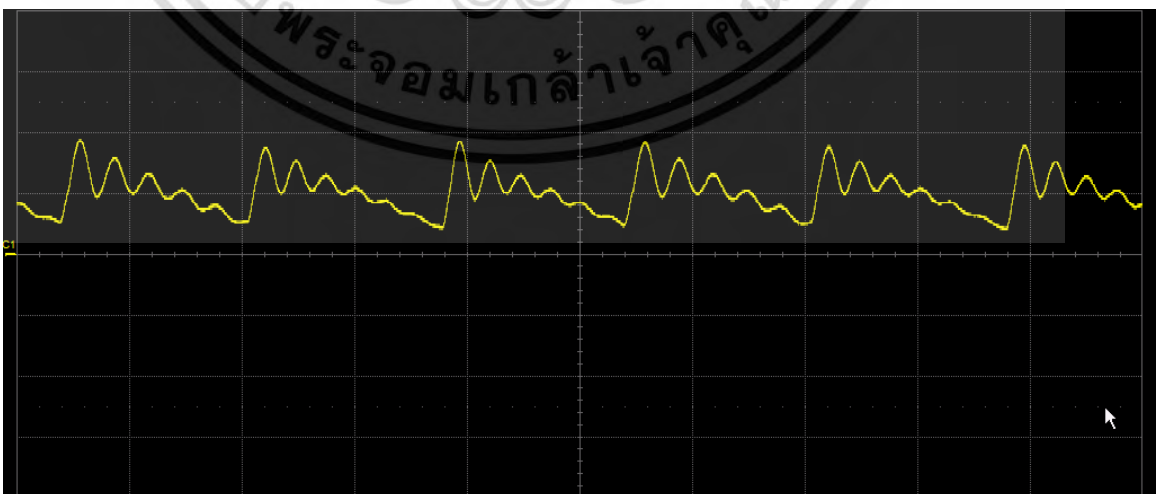


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



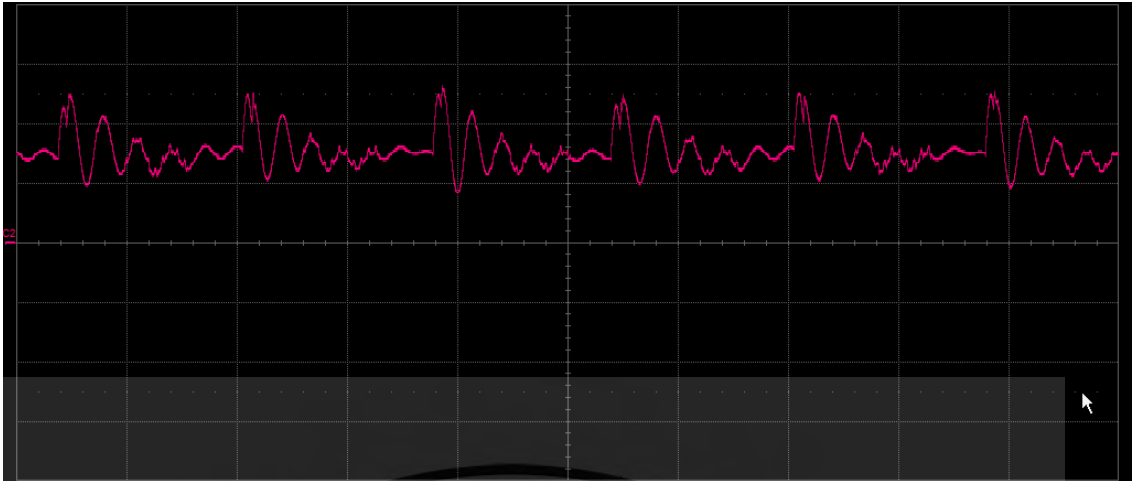
(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 750 W



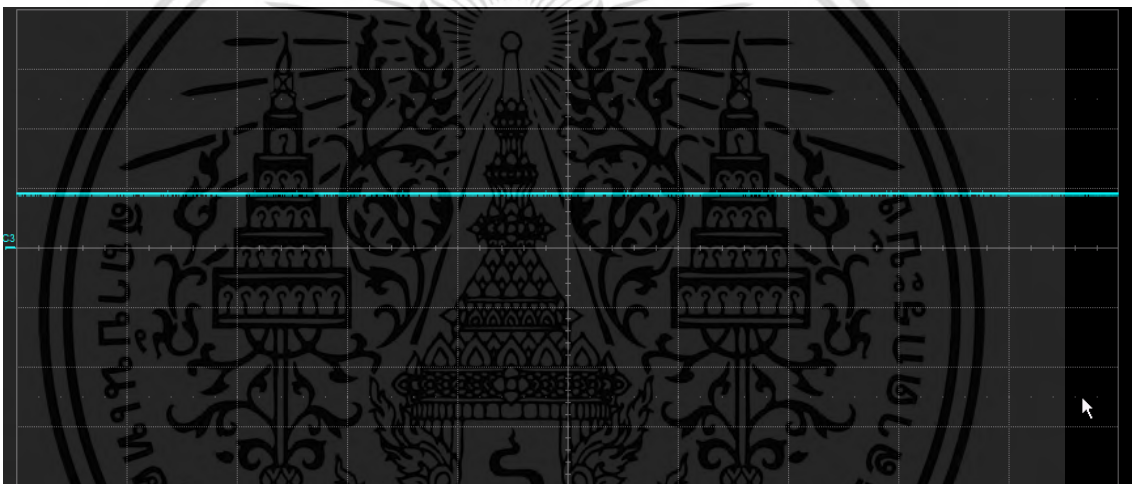
(ค) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

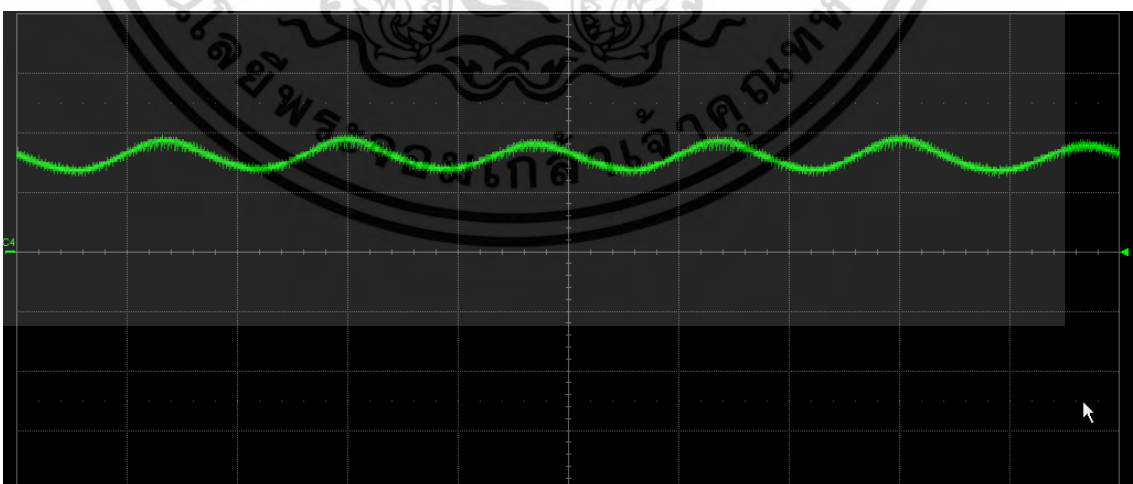


(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.30 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.31 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 500 V 600 กิโลเมตร 1500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคลื่นของกระแสและแรงดันขาเข้าสายส่งของแต่ละพิกัดโหลดพบว่า ทั้งรูปคลื่นแรงดันและกระแสก่อนเข้าสายส่งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกันคือ เมื่อพิกัดโหลดเป็น 300 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีรีปเปิลมากที่สุดแต่มีช่วงเวลาการแกว่งน้อยที่สุด เมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหลดเป็น 750 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีรีปเปิลที่ลดลงแต่ช่วงเวลาการแกว่งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปลี่ยนพิกัดโหลดเป็น 1500 W รูปคลื่นของแรงดันและกระแสจะมีรีปเปิลที่น้อยที่สุด

จากรูปคลื่นของกระแสและแรงดันขาออกสายส่งของแต่ละพิกัดโหลดพบว่า แรงดันขาออกสายส่งมีความเรียบเหมือนกันทั้งสามพิกัดโหลด แต่เมื่อเพิ่มโหลดพบว่า ค่ารีปเปิลของรูปคลื่นกระแสทั้งสามพิกัดโหลดไม่มีความแตกต่างกัน

4.3.3 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
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส A	W	316	311
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส B	W	323	314
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส C	W	325	318
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส A	var	329	283
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส B	var	315	270
ก กำลังไฟฟ้าเสมือนเฟส C	var	305	262
ก กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส A	VA	519	486
ก กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส B	VA	515	480
ก กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟส C	VA	515	483

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ตามลำดับเมื่อวัดปริมาณไฟฟ้าด้านขาออกสายส่งพบว่าแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ด้านขาเข้า 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองจากชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร วัดที่โหลด

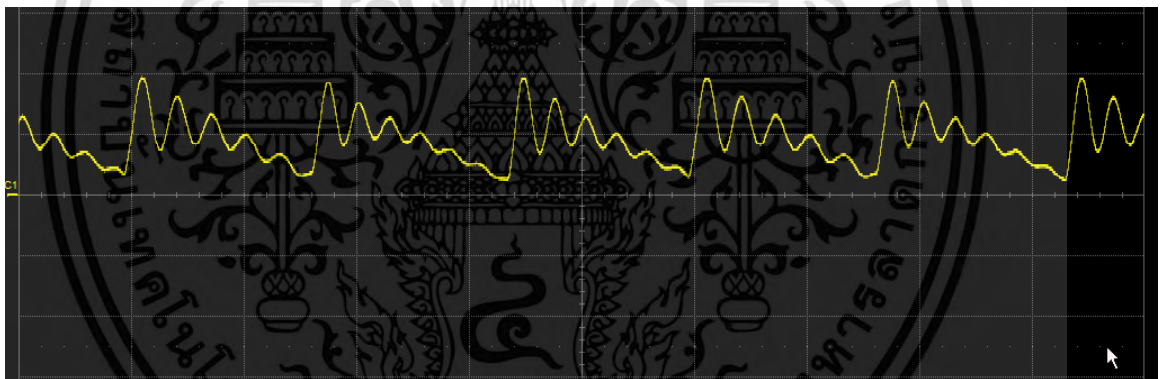
ปริมาณทางไฟฟ้า	หน่วย	พิกัดพิกัด (V)	
		450	500
แรงดันระหว่างเฟส AB	V	221.8	218.7
แรงดันระหว่างเฟส BC	V	221.6	218.7
แรงดันระหว่างเฟส CA	V	221.8	218.8
กระแสไลน์ A	A	1.76	1.75
กระแสไลน์ B	A	1.75	1.74
กระแสไลน์ C	A	1.76	1.75
กระแสเฟส AB	A	0.97	0.97
กระแสเฟส BC	A	0.97	0.97
กระแสเฟส CA	A	0.98	0.97
ก กำลังไฟฟ้าจริงเฟส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

ตารางที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่โหลดของแต่ละเฟสยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิมที่ประมาณ 220 V ทั้ง 3 เฟส ส่วนกระแส และก กำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ที่โหลดมีค่าลดลงเมื่อแรงดันขาเข้าสายส่งเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดัน 450 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.76 A และ 215.146 W ตามลำดับ และแรงดัน 500 V วัดค่ากระแสไฟฟ้าไลน์และกกำลังไฟฟ้าเฟส A ได้เท่ากับ 1.75 A และ 212.139 W ตามลำดับ

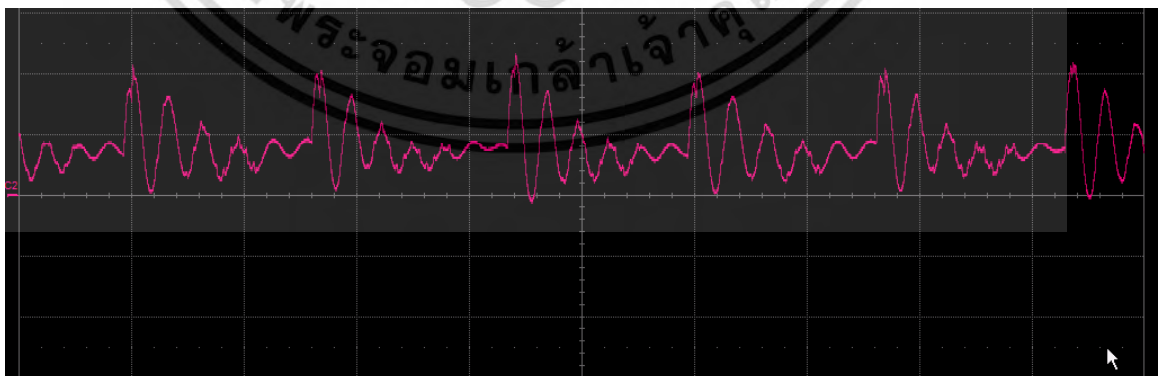
ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดตำแหน่งต่าง ๆ จากชุดทดลองระบบสายส่งเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน

พิกัดแรงดัน (V)	ก ำลังไฟฟ้าจริงที่วัด ณ จุดต่าง ๆ (W)			
	ต าแหน่งA	ต าแหน่งB	ต าแหน่งC	ต าแหน่งD
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 จะเห็นว่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดัน เกิดขึ้นกับสายส่ง



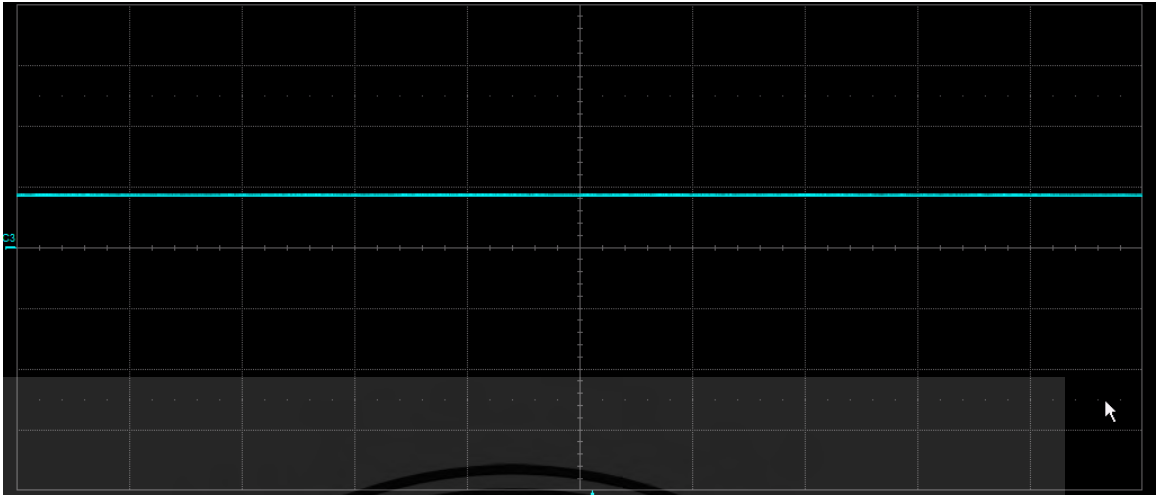
(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาเข้าสายส่ง



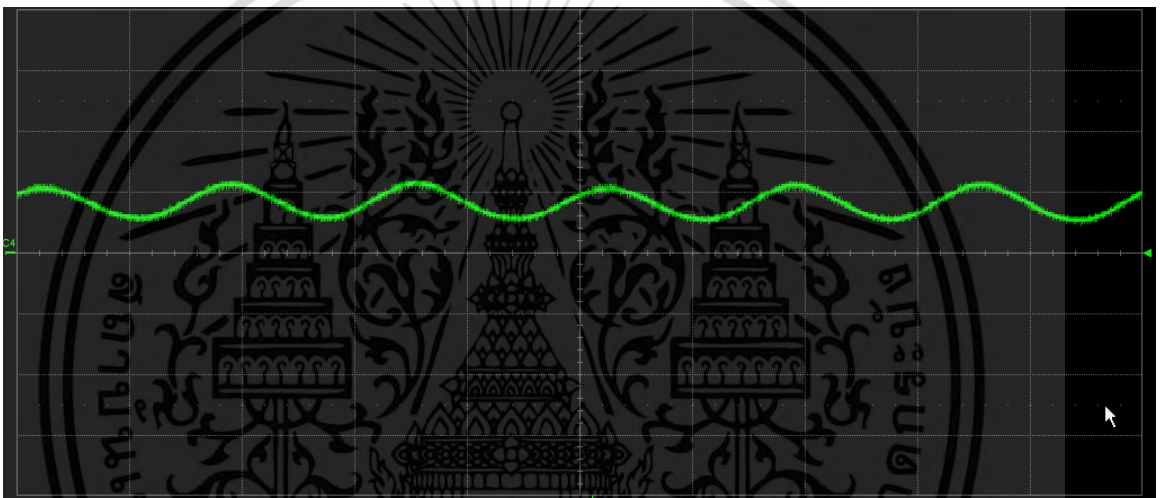
(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.32 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

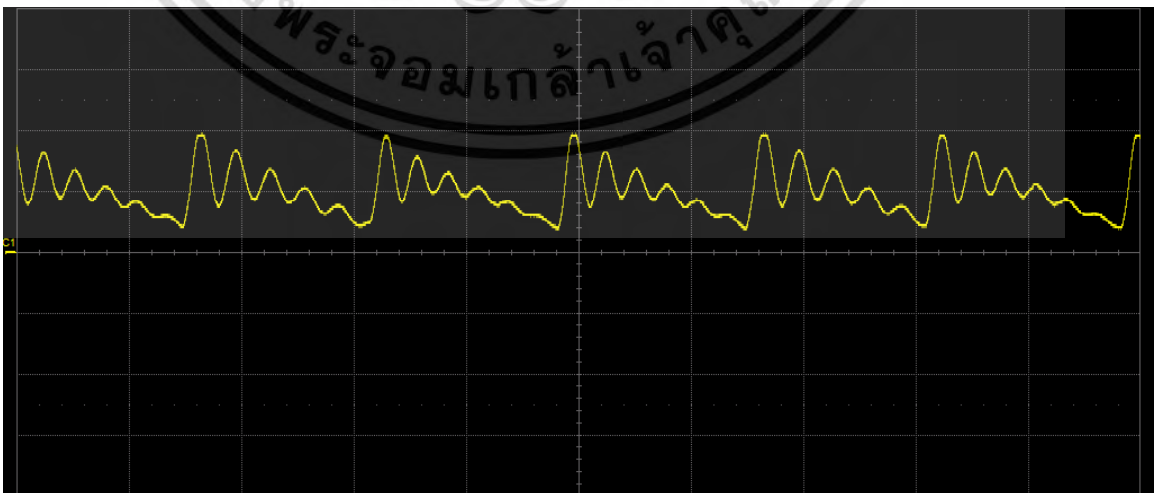


(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



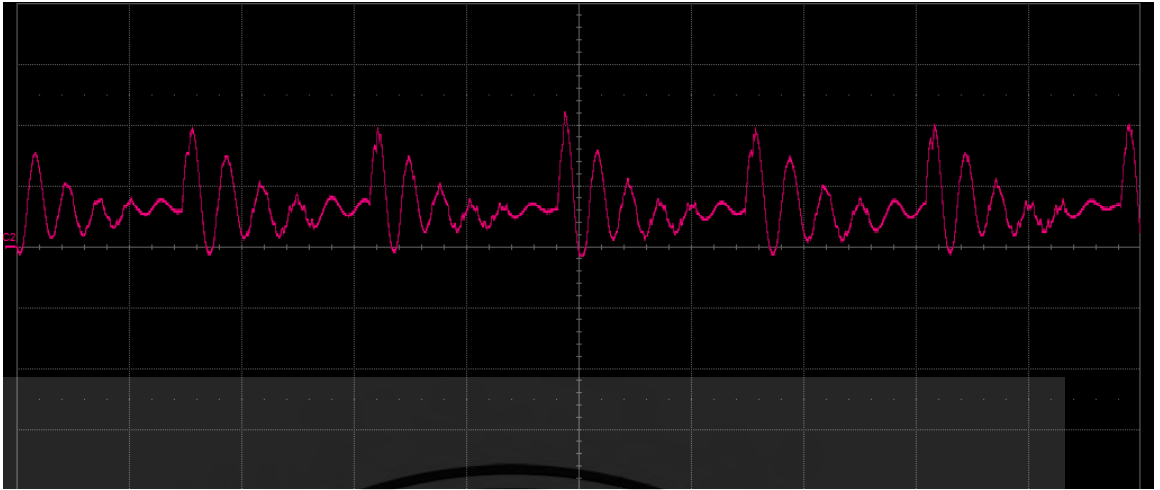
(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.33 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 450 V



(ค) รูปคลื่นแรงดันขาเข้าสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

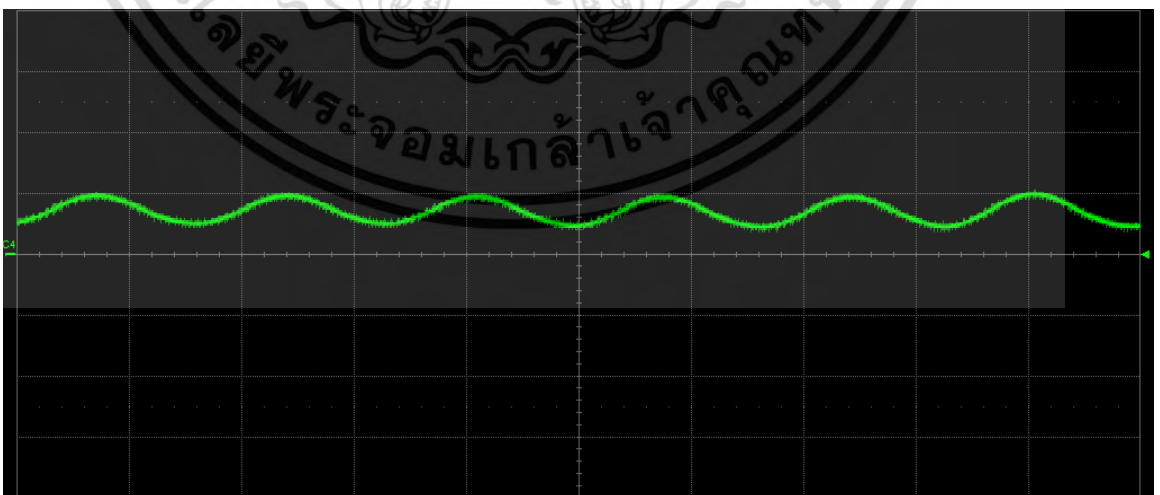


(ข) กระแสขาเข้าสายส่ง

รูปที่ 4.34 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ต้นทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V



(ก) รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่ง



(ข) กระแสขาออกสายส่ง

รูปที่ 4.35 รูปคลื่นของปริมาณทางไฟฟ้า ณ ปลายทางสายส่งที่พิกัด 750 W 600 กิโลเมตร 500 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าสายส่งของแต่ละพิกัดแรงดันพบว่า เมื่อเพิ่มพิกัดแรงดันส่งผลให้ค่ารีปเปิลของรูปคลื่นแรงดันนั้นมีค่าลดลง แต่ช่วงเวลากว้างของรูปคลื่นนั้นจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณากระแสขาเข้าสายส่งพบว่ารีปเปิลและช่วงเวลากว้างของรูปคลื่นไม่ มีความแตกต่างกัน

จากรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกสายส่งของแต่ละพิกัดแรงดันพบว่า รูปคลื่นแรงดันขาออกสายส่งมีความเรียบไม่แตกต่างกัน แต่รูปคลื่นกระแสขาออกสายส่งของแรงดันพิกัด 500 V มีค่ารีปเปิลน้อยกว่าแรงดันพิกัด 450 V เล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

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

เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของสายส่ง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบส่ง โดยทำการทดลองผ่านชุดทดลองและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าจากกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

1. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวสายส่ง

โดยทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จาลองที่ความยาวสายส่ง 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. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จากระดับพิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดของโหลดที่เปลี่ยนนั้นมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของระบบ ไม่ว่าจะเป็นค่าที่วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์ 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. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของสายส่ง

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

4. การจำลองด้วยชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อทำการเปลี่ยนความยาวสายส่ง

โดยทำการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V 750 W โดยเปลี่ยนแปลงความยาวสายส่ง จากระดับความยาวสายส่ง 150 300 และ 600 กิโลเมตร โดยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะพบว่าความยาวสายส่งที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าแต่ละชนิดต่างกัน โดยในสายส่งที่มีความยาว 150 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 0.9994 % และ 0.9994 % ตามลำดับ ในสายส่งความยาว 300 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 2.02 % และ 2.02 % ตามลำดับและที่ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร มีค่าความสูญเสียและแรงดันตกในสายส่งเป็น 3.695 % และ 3.695 % ตามลำดับ

5. การจำลองด้วยชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อทำการเปลี่ยนพิกัดโหลด

ผลการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 500 V ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดโหลด จากระดับพิกัดโหลด 300 750 และ 1500 W ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพิกัดของโหลดที่เปลี่ยนนั้นมีผลต่อปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของระบบ ไม่ว่าจะเป็นค่าที่วัดระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิและเรกติไฟเออร์ ค่าที่ต้นทางและปลายทางของสายส่ง 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. การจำลองด้วยชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เมื่อเปลี่ยนพิกัดแรงดันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของสายส่ง

การจำลองระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงพิกัด 750 W ความยาวสายส่ง 600 กิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงพิกัดแรงดัน จากระดับพิกัดแรงดัน 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 อินเวอร์เตอร์ที่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ และขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้มากพอ
2. เนื่องจากข้อจำกัดของอินเวอร์เตอร์ในระบบจำลองให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 3 HP ดังนั้นภาระทางไฟฟ้าที่จะนำมาใช้กับระบบจำลองไม่สามารถมีค่าเกิน 3 HP
3. ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณกับในระบบจำลองมีค่าไม่ตรงกัน จึงอาจทำให้เกิดการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้
4. ชุดทดลองมีการระบายความร้อนด้วยพัดลมทางด้านหลัง การจัดวางจึงไม่ควรให้ด้านหลังชุดชิดผนัง

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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.” *CIGRÉ 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] Jovcic, 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 10th* (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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 อัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลอง

อัตราส่วนระหว่างค่าจากระบบจริงกับค่าจากระบบจำลองคำนวณเพื่อปรับค่าเทียบระหว่างพารามิเตอร์จากระบบจริงให้มาใช้ในระบบจำลองแทนได้ โดยปรับได้ดังนี้

แรงดัน Base 450 V

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

แรงดัน Base 500 V

$$\text{มีอัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจำลองต่อระบบจริงเท่ากับ } \frac{333.33}{300} = 1.11$$

ก.2 การหาค่าความต้านทาน (R) [41]

ในการหาค่าความต้านทานเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นทำได้โดยคำนวณจากค่าความต้านทานต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.015 (Σ/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

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความต้านทานเป็น

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

ก.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) [41]

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

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.25 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 26.73 \text{ mH} \text{ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น } 27 \text{ mH}$$

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.50 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 53.46 \text{ mH} \text{ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น } 53 \text{ mH}$$

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$0.75 \times 150 \times 0.792 \times 0.9 = 80.19 \text{ mH} \text{ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น } 80 \text{ mH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.25 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 53.46 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 53 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.50 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 106.92 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 107 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.75 \times 300 \times 0.792 \times 0.9 = 160.38 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 160 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.25 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 106.92 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 107 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.50 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 213.84 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 214 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.75 \times 600 \times 0.792 \times 0.9 = 320.76 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 320 mH

ที่แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.25 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 33 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 30 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.50 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 66 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 65 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.75 \times 150 \times 0.792 \times 1.1111 = 99 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 95 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.25 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 66 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 65 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.50 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 132 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 130 mH

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.75 \times 300 \times 0.792 \times 1.1111 = 198 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 195 mH

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.25 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 132 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 130 mH

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น
 $0.50 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 264 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถท ำได้ง่ายขึ้นเป็น 260 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความเหนี่ยวนาเป็น $0.75 \times 600 \times 0.792 \times 1.1111 = 396 \text{ mH}$ ปรับค่าให้สามารถทำได้ง่ายขึ้นเป็น 395 mH

ก.4 การหาค่าความจุไฟฟ้า (C) [41]

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าแต่ละระยะทางนั้นหาได้โดยคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้าต่อกิโลเมตร โดยในการทดลองนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ $0.0144/2 = 0.0072$ (:F/km) จากงานวิจัย [41] ซึ่งเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในระบบจ ลางตัวอย่าง Simple 6-Pulse HVDC Transmission System 500 MW ของโปรแกรม MATLAB โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

แรงดัน Base เท่ากับ 450 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.25 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.3 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.27 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.50 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.6 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.75 \times 150 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.9 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.8 μF

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.25 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.9} = 0.6 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 0.49 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.50 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.9} = 1.2 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.75 \times 300 \times \frac{0.0072}{0.4} = 1.8 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1.5 μF

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.25 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.9} = 1.2 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 1 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.50 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.4} = 2.4 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 2 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น $0.75 \times 600 \times \frac{0.0072}{0.9} = 3.6 \mu\text{F}$ ปรับค่าให้เป็นค่าที่มีจำหน่ายเป็น 3 μF

แรงดัน Base เท่ากับ 500 V

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.25 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.243 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 0.27 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.50 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.486 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 0.49 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 150 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.75 \times 150 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.729 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 0.8 μF

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.25 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.486 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 0.49 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.50 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.972 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 1 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 300 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.75 \times 300 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 1.458 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 1.5 μF

ที่ 25% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.25 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 0.972 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 1 μF

ที่ 50% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.50 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 1.944 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 2 μF

ที่ 75% ของสายส่งระยะทาง 600 กิโลเมตร ต้องปรับค่าความจุไฟฟ้าเป็น
 $0.75 \times 600 \times \frac{0.0072}{1.1111} = 2.916 \mu\text{F}$ ปัดค่าให้เป็นค่าที่มีจ วน่ายป็น 3 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-0361-030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีพลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ. ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ		รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	งบลงทุน		
1 ธ.ค. 60	ตัวเหนี่ยวนา	IV1712007							12,000.00		12,000.00
1 ธ.ค. 60	ตัวเหนี่ยวนา	IV1712008							12,000.00		12,000.00
6 ม.ค. 61	ยิปซัมดูราชอบเรียบ	204586							2,089.00		2,089.00
8 ม.ค. 61	SCT-013-030 CT 0-30A to 0-1V	IV6101080096							1,206.00		1,206.00
13 ม.ค. 61	สเปรย์โฟม B.bond PU 500ml	006325							3,191.00		3,191.00
16 ม.ค. 61	แม่เหล็กนีโอเนียม	INV-201801110019							100.00		100.00
17 ม.ค. 61	HandyBox	GB010181							53,687.25		53,687.25
18 ม.ค. 61	สายไฟ THW 1x2.5	IV6100013							6,717.46		6,717.46
20 ม.ค. 61	ไม้อัดขาว 10 มม.	IV6100016							12,840.00		12,840.00
22 ม.ค. 61	ESP-01 (ESP8266)	#220130385							275.00		275.00
25 ม.ค. 61	สายไฟ VAF-GRD 2X2.5/2.5 sq. mm.	IV6100023							19,210.78		19,210.78
26 ม.ค. 61	Mini USB Cable 1.5m	#92572							330.00		330.00
31 ม.ค. 61	อัดยาง 20 มิล	033-1640							1,166.30		1,166.30
31 ม.ค. 61	แม่เหล็ก 20x10x3	1216-60774							335.45		335.45

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-0361-030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีพลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ. ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ		รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	งบลงทุน		
21 ก.พ. 61	สายไฟ THW 1x10	IV6100162							13,214.50		13,214.50
17 ก.พ. 61	ราง Cable Tray 1000mm.	IV6100156							13,867.20		13,867.20
13 ก.พ. 61	สายไฟ THW 1x1.5	IV6100149							15,026.01		15,026.01
15 ก.พ. 61	ปลั๊กกราวด์คู่	IV61020160							26,782.10		26,782.10
20 ก.พ. 61	ท่อน IMC 1/2"	GB020217							53,570.62		53,570.62
5 ก.พ. 61	HandyBox	GB020044							37,476.75		37,476.75
6 ก.พ. 61	แม่เหล็ก 20x10x3	1217-60812							693.36		693.36
9 ก.พ. 61	MAX3232 RS232 to TTL	IV6102090090							310.00		310.00
14 ก.พ. 61	Magnetic Door Switch	IV6102140092							139.00		139.00
27 ก.พ. 61	อะคิลิค	229-11443							85.60		85.60
21 ก.พ. 61	NPN 50V/150 MA	INV-201802210103							156.00		156.00
22 ก.พ. 61	LED T8 Dimmable Series	TI-61-02-625							4,280.00		4,280.00
27 ก.พ. 61	Hioki Lux Meter	IV1802-033							27,820.00		27,820.00
18 ก.พ. 61	ตลับหมึกโทนเนอร์	SI1802034903							18,698.99		18,698.99

บันทึกรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-0361-030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีพลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ. ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายรับ		รายจ่าย			รวม รายจ่าย		
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	งบลงทุน				
	รวมครั้งที่ 1						-	-	-	412,168.37	-	-	74,900.00
	ครั้งที่ 2												
20 ก.พ. 61	AM/FM Amplifier	1800000560								108.00			
20 ก.พ. 61	สายไฟ จัมเปอร์ สายแพ	IV6102200082								928.00			
7 มี.ค. 61	สาย VAF-GRD 2x2.25/2.5 Sq. mm.	IV6100804								18,575.20			
8 มี.ค. 61	Lithium battery charging and pote	IV6103080081								515.00			
15 มี.ค. 61	Relay Module Shield 1Channel 5V	1800000824								295.00			
15 มี.ค. 61	สปริง 1.2mm	376								520.00			
16 มี.ค. 61	น้ ฆากัดปรินท์	1800000848								200.00			
17 มี.ค. 61	บล็อกยาง STONE สีด ๑	17-004								856.00			
20 มี.ค. 61	EPOXY8X12	1800000920								175.00			
24 มี.ค. 61	Currect Sensor Carrier 15.5A	E-610300434								1,819.00			
26 มี.ค. 61	HD 6.0 TB WD SATA-III 64 MB	1896874								8,050.00			

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-0361-030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีพลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ. ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ		รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	งบลงทุน		
29 มี.ค. 61	Lithium battery charging and pote	IV6103290005							424.00		
29 มี.ค. 61	สปริง 2mm	380							330.00		
30 มี.ค. 61	สาย 2.54mm 40 pin	9601							1,280.00		
5 เม.ย. 18	2A DC-DC Step up Booster Power	1800001274							178.00		
16 เม.ย. 18	หลอด LED FLASH 18W DL DL LAM	213074							2,475.00		
17 เม.ย. 18	หลอด LED FLASH 18W WW E27 LAN	7916							5,500.00		
21 เม.ย. 18	หลอด LED FLASH 18W WW E27 LAN	7996							2,750.00		
21 เม.ย. 18	Relay Module Shield 4Channel 5V	1800001516							380.00		
22 เม.ย. 18	24-6 แพลนบอร์ด 65*122	101-000187							230.00		
23 เม.ย. 18	2A DC-DC Step up Booster	1800001552							327.00		
11 พ.ค. 18	หนังสือ Labview and Arduino	8							1,800.00		
14 พ.ค. 18	ลูกยอยสวิตซ์ตัดตอน	SK3180555371							12,864.00		
16 พ.ค. 18	Relay Module 5V 2Ch	1800001843							235.00		
18 พ.ค. 18	สายไฟ	BAP180513993							5,129.00		

บันทึกรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ A118-0361-030 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561

แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์และพัฒนาชุดทดลองระบบส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีพลังงานทดแทนเชื่อมต่ออยู่

ชื่อหัวหน้าโครงการ: รศ. ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ		รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบด เนินงาน		งบลงทุน		
18 พ.ค. 18	ลินชักไม้ MDF 49*65*28*17	132							4,151.60			
18 พ.ค. 18	P/N: B-L072Z-LRWAN1	R0041/18							1,819.00			
18 พ.ค. 18	Sensor Board	R20180503							800.00			
	รวมครั้งที่ 2								72,713.80	-	-	24,000.00

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ

วันที่24 กันยายน 2561.....

ประวัติคณะผู้วิจัย

- ชื่อ (ภาษาไทย) รศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล
(ภาษาอังกฤษ) Atthapol Ngaopitakkul, Ph.D.

วัน เดือน ปีเกิด 28 สิงหาคม 2521 อายุ 40 ปี

เพศ ชาย สถานะทางการสมรส โสด

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5849990003908

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-329-8330 โทรสาร 02-329-8330

เบอร์มือถือ 0817324318 Email knatthap@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรีสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (B.Eng)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จ 2545	
ปริญญาโทสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (M.Eng)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จ 2547	
ปริญญาเอกสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (D.Eng)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จ 2550	

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ Power System, Power System Protection, Application of Wavelet Transform to power system protection, Artificial Neural Networks, Illumination, Energy Management

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยย้อนหลัง 3 ปีและผลงานวิจัยอื่นๆ (เช่น Proceedings หนังสือ ฯลฯ)

Journal Papers

1. A. Ngaopitakkul, and C. Jettanasen, "A Discrete Wavelet Transform Approach to Discriminating among Inrush Current, External Fault, and Internal Fault in Power Transformer using Low-Frequency Components Differential Current Only," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (TEEE), Vol. 9, No. 3, May, 2014, pp. 302-314. (ISI Impact factor 2012 = 0.343)
2. T. Patcharoen, and A. Ngaopitakkul, "A novel discrete wavelet transform based on travelling wave technique for identifying the fault location for transmission network systems," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 8, No. 5, September, 2013, pp. 432-439. (ISI Impact factor 2012 = 0.343)
3. A. Ngaopitakkul, and S. Bunjongjit, "An application of a discrete wavelet transforms and a back-propagation neural network algorithm for fault diagnosis on single-circuit transmission line," International Journal of Systems Science (IJSS), Vol. 44, No. 9, September, 2013, pp. 1745-1761. (ISI Impact factor 2012 = 1.305)
4. C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "A Novel Probabilistic Neural Networks-Based Algorithm for Classifying Internal Fault in Transformer Windings" IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (TEEE), Vol. 8, No. 2, March, 2013, pp. 123-131. (ISI Impact factor 2011 = 0.394)
5. A. Ngaopitakkul and C. Jettanasen, "Selection of Proper Activation Functions in Back-Propagation Neural Networks Algorithm for Identifying the phase with fault appearance in Transformer Windings," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 8, No. 6, June, 2012, pp. 4299-4318. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)
6. S. Bunjongjit and A. Ngaopitakkul, "Selection of Proper Artificial Neural Networks for Fault Classification on Single Circuit Transmission Line," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 8, No. 1(A), January, 2012, pp. 361-374. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)
7. A. Ngaopitakkul and C. Jettanasen, "The comparisons technique of coefficient DWT for identifying Simultaneous Fault Types on Transmission System," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol. 7, No. 10, October, 2011, pp. 5789-5800. (ISI Impact factor 2010 = 1.664)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการทำงานที่สำคัญ และ Professional Activities

Committee : IEEJ-EIT Joint Symposium : Advanced Technology in Power Systems (2008-2009)

Committee : Illuminating Engineering Association of Thailand (TIEA) (Jan 2008 – Present)

Committee : Thai Mechanical and Electrical Design and Consulting Engineer Association (MECT)
(Oct 2008 – Present)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- Dec 2013 – Present Head of Research Project “Study and Analysis on Impact and Performance of Distribution System Connected to Multi-Distributed Generation” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, Thailand}
- Oct 2013 – Present Head of Research Project “Analysis of Energy Consumption and Electromagnetic Interference (EMI) Problems for Light Emitting Diode (LED) Street Light” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, Thailand}
- Dec 2012 – Present Head of Research Project “Development of Earth Terminal Configuration of Towers Using Impulse Characteristics” {Supported by the EGAT Research Fund, Thailand}
- Sep 2012 – May 2013 Advisor of Research Project “Study and analysis the effect of harmonics noise of LED lamp” {Supported by EPPO Fund, Thailand}
- Mar 2012 – Sep 2013 Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent for Fault Diagnosis in Distribution System” {Supported by the National Research Council of Thailand, Thailand}
- Sep 2011 – May 2012 Advisor of Research Project “Study and analysis of harmonics issued from electronic ballast of T5 fluorescent lamp” {Supported by EPPO Fund, Thailand}
- Oct 2010 – Sep 2011 Researcher of Project “The Classification of fault in power transformer using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sep 2010 – May 2011 Advisor of Research Project “Feasibility and System Impact Study of Energy Saving using T5 in Building” {Supported by EPPO Fund, Thailand}
- Dec 2009 – Nov 2011 Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent Algorithm for Simultaneous Fault Diagnosis in Electrical Power Transmission Systems” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, Thailand}
- Oct 2009 – Sep 2010 Head of Research Project “Fault Diagnosis in Underground Cable Systems using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}
- Oct 2008 – Sep 2009 Researcher of Project “Fault Analysis on Single Circuit Transmission line Using Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}
- Oct 2007 – Sep 2008 Researcher of Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Neural Network for Fault Diagnosis in Transmission Systems” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน
(ภาษาอังกฤษ) Chaiyan Jettanasen, Ph.D.

วัน เดือน ปีเกิด 26 สิงหาคม 2522 อายุ 38 ปี

เพศ ชาย สถานะทางการสมรส สมรส

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3720901020204

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-329-8330 โทรสาร 02-329-8330

เบอร์มือถือ 080-0220851 Email kjchaiya@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก ปีที่จบ พ.ศ.2551

Ph.D. of Electrical Engineering (Docteur en Génie Electrique), Ecole Centrale de Lyon, France

ปริญญาตรี-โท ปีที่จบ พ.ศ. 2548

Master of Electrical Engineering (Master de Recherche en Génie Electrique) /
Diploma of Electrical Engineering (Diplôme d'ingénieur), Institut National des
Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

EMI/EMC in power electronic systems, ESD in electric/electronic system,
Conversion of electrical energy, Power electronics

ผลงานวิจัยย้อนหลัง 3 ปีและผลงานวิจัยอื่นๆ (เช่น Proceedings หนังสือ ฯลฯ)

Journal Papers

1. C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "A Novel Probabilistic Neural Networks-Based Algorithm for Classifying Internal Fault in Transformer Windings" IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (TEEE), Vol. 8, No. 2, March, 2013, pp. 123-131. (ISI Impact factor 2011 = 0.394)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Chaiyan Jettanasen, "Modeling and Optimizing a Passive EMI Filter to Attenuate Common-Mode Currents at High Frequency in a Three-Phase Adjustable-Speed AC Motor Drive", International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), ISSN 1349-4198, Vol. 8, No. 10 (A), October 2012, pp. 6629 – 6642 (ISI Impact Factor 2010: 1.664)
3. C. Jettanasen, F. Costa, C. Vollaie, "Common mode emissions measurements and simulation in variable-speed drive systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 11, November 2009.

National/International Conference Papers

1. C. Jettanasen, "Analysis of Conducted Electromagnetic Interference Generated by PWM Inverter Fed-AC Motor Drives", The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), Sapporo, Japan, October 21-24, 2012.
2. C. Jettanasen, "Reduction of Common-Mode Voltage Generated by Voltage-Source Inverter using Proper PWM Strategy", 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & Technical Exhibition on EMC RF/Microwave Measurement & Instrumentation, Singapore, May 21-24, 2012.
3. C. Jettanasen, "Design of Electrostatic Discharge Event Detector", IEEE TENCON 2011, Bali, Indonesia, November 21-24, 2011.
4. C. Jettanasen, "Pulse Width Modulation Technique to Attenuate Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source Inverter-fed AC Motor Drive ", The International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011), Hong Kong, July 10-14, 2011.