

แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้า  
พลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

DESIGN OF LIGHTNING PROTECTION FOR  
GROUND-MOUNTED PHOTOVOLTAIC FARM

วิศรุต อัสวฉัตรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้า  
พลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

วิศรุต อัครฉัตรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์   แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
แบบติดตั้งบนพื้นดิน  
Design of Lightning Protection for Ground-Mounted Photovoltaic Farm

ชื่อ - นามสกุล       นายวิศรุต อิศวนัตถรสกุล

สาขาวิชา           วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา     รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

ปีการศึกษา           2561

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนฑล นาวงษ์, วศ.ด.)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวักร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่    เดือน           พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน
ชื่อ - นามสกุล	นายวิศรุต อิศวาน์ตรสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน อัตรากำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW โดยการใช้โปรแกรม PSCAD Version 4.6 ในการสร้างแบบจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าและวิเคราะห์ผลกระทบของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อนำผลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม PSCAD ได้จำลองลักษณะของการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่า 3 กรณี คือ ฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s และฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s โดยเลือกใช้ค่ากระแสฟ้าผ่า 3 ระดับ คือ 20 kA 40 kA และ 60 kA และกำหนดจุดที่ฟ้าผ่าลง 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณสายไฟฟ้าด้านไฟฟ้ากระแสตรง และบริเวณสายไฟฟ้าเฟส B ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ที่มีพิสัยป้องกันกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA นำมาติดตั้งในระบบด้าน 1 เฟส และ 3 เฟส เพื่อทำการเปรียบเทียบผลค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและนำมาติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยกรณีของฟ้าผ่าตรงลำแรก ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลง 10.73% 5.94% และ 4.26% กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลง 12.51% 7.16% และ 5.21% และในกรณีฟ้าผ่าทางอ้อมค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลง 51.43% 32.20% และ 24.16% ตามลำดับ ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินต่อไป

**คำสำคัญ:** ฟ้าผ่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กระแสฟ้าผ่า รูปคลื่นฟ้าผ่า อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

<b>Thesis Title</b>	Design of Lightning Protection for Ground-Mounted Photovoltaic Farm
<b>Name - Surname</b>	Mr. Witsarut Assawachatsakul
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

This thesis aimed to study the impact of lightning events on the ground-mounted photovoltaic farm with a generation capacity of 10 MW or less. PSCAD 4.6.0 program was used to create lightning models and to analyze the effects of the peak voltage and the current in the power system. Then, the effective lightning protection in the solar power system was designed and tested.

PSCAD 4.6.0 program was operated to simulate three lightning events in the power system: 10/350  $\mu$ s direct lightning waveform, 0.25/100  $\mu$ s direct lightning waveform, and 8/20  $\mu$ s indirect lightning waveform. In each lightning waveform experiment, three lightning currents were included: 20 kA, 40 kA, and 60 kA. The lightning point bolts were at the DC side and AC side of phase B. After that, the design of 40 kA lightning protection device was installed in the one-phase and the three-phase systems. Then, the maximum voltages of the solar system, with and without the lightning protection equipment, were compared.

The study revealed that the lightning protection equipment installed in the solar power system could reduce the maximum voltage of the solar system. The maximum voltages of the first direct lightning events were decreased by 10.73%, 5.94%, and 4.26%, respectively. Moreover, the maximum voltages of the second direct lightning events were declined by 12.51%, 7.16%, and 5.21%, respectively. Furthermore, the maximum voltages of the indirect lightning events were dropped by 51.43%, 32.20%, and 24.16%, respectively. In conclusion, these results could be used as a guideline for the design of lightning protection systems to prevent the damages of the equipment in ground-mounted photovoltaic farms.

**Keywords:** lightning, photovoltaic farm, lightning current, lightning waveform, lightning protection

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ จากรองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนถึงแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างสูงในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี นาวงษ์ กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้ ขอบคุณผู้บังคับบัญชา หัวหน้าแผนกมิเตอร์ และเพื่อนพนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอหนองแค ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือ และสนับสนุนการศึกษาทำวิจัยเป็นอย่างดี ขอบคุณ บริษัท 17 อัญญวีร์ โฮลดิ้ง จำกัด ที่สนับสนุน ข้อมูลแบบผังทางไฟฟ้าแบบผังทางโยธาและรายละเอียดอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่จังหวัดสระบุรีให้ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้สนับสนุนโปรแกรม PSCAD Version 4.6 ขอบคุณ เพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโท รุ่นที่ 10 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัชบุรี รวมทั้ง พี่ๆ น้องๆ ระดับปริญญาโทและปริญญาเอกในกลุ่มงานวิจัย PSRC LAB ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านจากชั้นอนุบาลถึงระดับปริญญาโทที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และหลักการบริหารงาน มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิศรุต อัสวฉัตรสกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	(22)
บทที่ 1 บทนำ.....	23
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	25
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	25
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	25
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	25
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	26
1.6 ข้อยกเว้นของวิทยานิพนธ์.....	26
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	27
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.2 ทฤษฎีฟ้าผ่า.....	31
2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่า.....	38
2.4 มาตรการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า.....	41
2.5 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	45
2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	50
2.7 สมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	52
2.8 การผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	53
2.9 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	55
2.10 รูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	57



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 การใช้งาน โปรแกรม PSCAD Version 4.6.....	59
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	67
3.1 ศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน .....	70
3.2 ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	76
3.3 การสร้างแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฟ้าผ่า.....	82
3.4 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	87
3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตามกรอบแนวคิด .....	93
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	95
4.1 ฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Strike) .....	96
4.2 กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike) .....	158
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	176
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	176
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	177
บรรณานุกรม .....	179
ภาคผนวก .....	183
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PSCAD Program Solution .....	184
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	203
ประวัติผู้เขียน.....	229



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่	2.1 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าลำแรก .....	35
ตารางที่	2.2 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าลำต่อมา.....	35
ตารางที่	2.3 ค่าคงที่ในการคำนวณสมการฟ้าผ่า $A$ -factor .....	36
ตารางที่	3.1 ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) แบบ 1 เฟส ผลิตภัณฑ์ ABB....	80
ตารางที่	3.2 ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) แบบ 3 เฟส ผลิตภัณฑ์ ABB....	81
ตารางที่	3.3 แสดงคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุบางชนิด.....	88
ตารางที่	3.4 แสดงค่าความต้านทานของสายไฟฟ้าตามความระยะสายในจุดต่างๆ .....	92
ตารางที่	4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำแรกรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า.....	96
ตารางที่	4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำแรกรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า.....	105
ตารางที่	4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำแรกรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า.....	114
ตารางที่	4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำแรกรูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า.....	123
ตารางที่	4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า .....	140
ตารางที่	4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า .....	142

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลุ่มต่อมารูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ ป้องกันฟ้าผ่า .....	145
ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของ ฟ้าผ่าลุ่มต่อมารูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	148
ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	158
ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	160
ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	163
ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	165

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 รูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	24
รูปที่ 2.1 Benjamin Franklin และ การทดลองปรากฏการณ์ฟ้าผ่าโดยใช้ว่าว.....	31
รูปที่ 2.2 การกระจายของประจุในก้อนเมฆ.....	32
รูปที่ 2.3 ภาพสเก็ตการขยายตัวของหัวนําร่อง.....	33
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า.....	34
รูปที่ 2.5 ฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ.....	37
รูปที่ 2.6 แรงดันช่วงก้าว $U_s$ (Stepped Voltages) .....	41
รูปที่ 2.7 วิธีทรงกลมกลิ้ง.....	42
รูปที่ 2.8 วิธีมุมป้องกัน .....	42
รูปที่ 2.9 วิธีตาข่าย .....	43
รูปที่ 2.10 ขบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
รูปที่ 2.11 กราฟ I-V Curve.....	50
รูปที่ 2.12 ระบบการผลิตแบบอิสระ.....	55
รูปที่ 2.13 ระบบการผลิตแบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	56
รูปที่ 2.14 ระบบการผลิตแบบผสมผสาน .....	56
รูปที่ 2.15 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Solar Farm.....	57
รูปที่ 2.16 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Solar Rooftop .....	58
รูปที่ 2.17 แลบบเมนู โครงการ.....	59
รูปที่ 2.18 แลบบเมนู View.....	60
รูปที่ 2.19 แลบบเมนู Components .....	60
รูปที่ 2.20 แลบบเมนู Model.....	61
รูปที่ 2.21 การวัดผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า.....	61
รูปที่ 2.22 การสร้างช่องสัญญาณแสดงผล.....	61
รูปที่ 2.23 การเรียกหน้าต่างแสดงผลด้วยกราฟ .....	62
รูปที่ 2.24 หน้าต่างของกราฟแสดงผล .....	62
รูปที่ 2.25 โมเดลของโซล่าเซลล์ในโปรแกรม PSCAD .....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	64
รูปที่ 2.27 แผงควบคุม (Control Panel).....	64
รูปที่ 2.28 การสร้างช่องสัญญาณ (Signal).....	65
รูปที่ 2.29 การอินเตอร์เฟสข้อมูล.....	65
รูปที่ 2.30 การสร้างแผงปุ่มคอนโทรล.....	65
รูปที่ 2.31 การปรับตั้งค่าเวลาโปรแกรม PSCAD.....	66
รูปที่ 3.1 ขอบเขตพื้นที่ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน .....	68
รูปที่ 3.2 แบบผังทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน..	69
รูปที่ 3.3 แบบผังทางไฟฟ้าของกลุ่มแผงโซลาร์เซลล์ชนิด Thin Film.....	70
รูปที่ 3.4 จำนวนของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละ Section.....	72
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร กำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	73
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า.....	73
รูปที่ 3.7 แบบจำลองแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม PSCAD .....	74
รูปที่ 3.8 แบบจำลองของวงจร MPPT ในโปรแกรม PSCAD.....	75
รูปที่ 3.9 โครงข่ายการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบศูนย์รวม.....	76
รูปที่ 3.10 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบวงจรบริดจ์.....	77
รูปที่ 3.11 การต่ออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบวงจรบริดจ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.	77
รูปที่ 3.12 วงจรทางไฟฟ้าของกับดักฟ้า.....	78
รูปที่ 3.13 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าชนิด 1 เฟส .....	81
รูปที่ 3.14 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าชนิด 3 เฟส .....	82
รูปที่ 3.15 แสดงกราฟตัวอย่างค่ากระแสฟ้าผ่าที่รูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s ขนาด 20 kA.....	83
รูปที่ 3.16 แสดงกราฟตัวอย่างค่ากระแสฟ้าผ่าที่รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ขนาด 20 kA .....	84
รูปที่ 3.17 แสดงกราฟตัวอย่างค่ากระแสฟ้าผ่าที่รูปคลื่น 8/20 $\mu$ s ขนาด 20 kA .....	85
รูปที่ 3.18 แสดงวงจรฟ้าผ่าในโปรแกรม PSCAD .....	86
รูปที่ 3.19 แสดงหน้าต่าง Control การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่า.....	86
รูปที่ 3.20 ความต้านทานของตัวนำทรงกระบอก.....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.21	แสดงระยะความยาวของสายไฟจาก Combinerbox ถึง Inverter .....	89
รูปที่ 3.22	แบบจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	93
รูปที่ 3.23	กรอบแนวคิดในการศึกษาวิจัย .....	94
รูปที่ 4.1	การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	96
รูปที่ 4.2	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	97
รูปที่ 4.3	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	97
รูปที่ 4.4	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	98
รูปที่ 4.5	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	98
รูปที่ 4.6	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	99
รูปที่ 4.7	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	99
รูปที่ 4.8	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	100
รูปที่ 4.9	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	100
รูปที่ 4.10	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	101
รูปที่ 4.11	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	101
รูปที่ 4.12	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	102

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	102
รูปที่ 4.14 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	103
รูปที่ 4.15 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	103
รูปที่ 4.16 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	104
รูปที่ 4.17 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า .....	104
รูปที่ 4.18 การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	105
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	106
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	106
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	107
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	107
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	108
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	108
รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	109



## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.26	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	109
รูปที่ 4.27	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	110
รูปที่ 4.28	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	110
รูปที่ 4.29	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	111
รูปที่ 4.30	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	111
รูปที่ 4.31	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	112
รูปที่ 4.32	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก..... รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	112
รูปที่ 4.33	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	113
รูปที่ 4.34	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	113
รูปที่ 4.35	การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน AC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	114
รูปที่ 4.36	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	115
รูปที่ 4.37	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	115
รูปที่ 4.38	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350 $\mu$ s , 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า.....	116





















## สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
VSPP	Very Small Power Producer
AEDP	Alternative Energy Development Plan
IEC	International Electrotechnical Commission
PV	Photovoltaic
MOV	Metal Oxide Varistor
MW	Megawatt
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
$\mu s$	ไมโครวินาที
kV	กิโลโวลต์
A	พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ( $m^2$ )
$I$	กระแสค่ายอดคลื่น
$k$	สัมประสิทธิ์สำหรับกระแสค่ายอด
$\alpha$	เวลาคงตัวของหน้าคลื่น
$\beta$	เวลาคงตัวของหางคลื่น
$i_{(t)}$	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)
$I_{(s)}$	กระแสฟ้าผ่าช่วงก้ำที่ดิน
$kA / \mu S$	กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที
$S$	ระยะช่วงก้ำ
$t$	เวลา (ไมโครวินาที)
$T_1$	ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น (ไมโครวินาที)
$T_2$	ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น (ไมโครวินาที)
K	Kelvin

# บทที่ 1

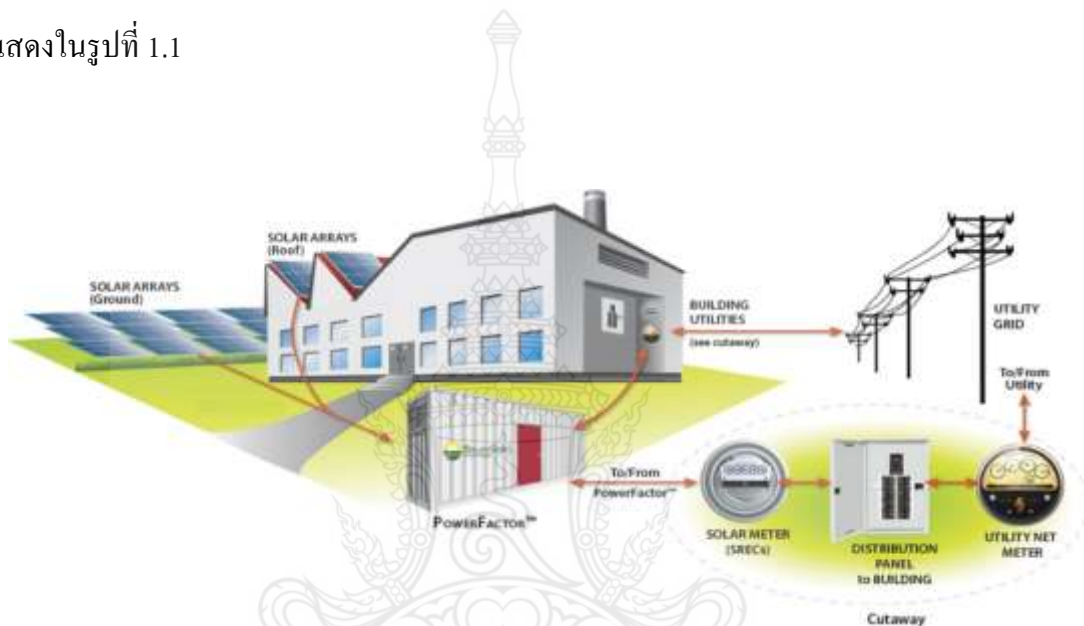
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในฐานะของผู้ผลิตและจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้า เนื่องจากมีนโยบายสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนจากรัฐบาลโดยกระทรวงพลังงานได้มีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมาตั้งแต่ปี 2532 โดยให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนขนาดเล็ก (Small Power Producer: SPP) ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม ต่อมาได้ขยายผลสู่การรับซื้อไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่นๆ ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซชีวภาพ ชยะ พลังงานน้ำ พลังงานลมจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer: VSPP) ขนาดไม่เกิน 10 MW เพื่อกระจายโอกาสไปพื้นที่ห่างไกลให้มีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้าและลดการลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่โดยสนับสนุนผ่านมาตรการส่วนเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้า (Adder) ซึ่งได้กำหนดเป้าหมายตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015) โดยการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนทั้งในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี 2579 จะเทียบเท่ากับการลดใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ราว 39,388 ktoe ซึ่งประเมิน เป็นมูลค่าการลดใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ 590,820 ล้านบาท [1]

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนับเป็นหน่วยงานที่มีการตอบสนองต่อนโยบายด้านพลังทดแทนเป็นอย่างมากเนื่องจากมีพื้นที่รับผิดชอบในการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟในระบบภาคครัวเรือนจนถึงผู้ไฟในภาคอุตสาหกรรมครอบคลุมพื้นที่ 74 จังหวัดยกเว้น กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งเป็นพื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง [2] สำหรับการสนับสนุนนโยบายด้านพลังงานทดแทน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ทั้งในส่วนของผู้ผลิตไฟฟ้าจากภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเองในปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดไม่ 10 MW [3] ประกอบกับการนำหลักเกณฑ์ในโครงการผลิตไฟฟ้าตามระเบียบของ คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ว่าด้วยการรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา สำหรับการรับซื้อไฟฟ้าเพิ่มให้ครบจำนวน 100 MW ในปี พุทธศักราช 2557 เป็นต้นมา

ผู้ไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer: VSPP) ที่พบส่วนมากในพื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในเขตพื้นที่ภาคกลางนั้น มีรูปแบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เนื่องจากเป็นระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับสภาพทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศของประเทศไทยในพื้นที่ภาคกลาง โดยลักษณะการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานจากแสงอาทิตย์ ที่พบเห็นมีด้วยกัน 2 ระบบคือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 รูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [4]

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินของบริษัทผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากภาคเอกชนแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ที่มีความเสี่ยงของกรณีการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าในช่วงฤดูฝน โดยสถิติของการเกิดฟ้าผ่าในประเทศไทยมีลักษณะของการเกิดล้ฟ้าผ่าแบบชั่วคราว ค่ากระแสฟ้าผ่าสูงสุด ขนาด 20 kA [5] ซึ่งอาจสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อุปกรณ์ในระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รับความเสียหายหรือมีผลกระทบต่อเสถียรภาพความสมดุลของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในระบบ 22 kV ดังนั้นในการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าและหาแนวทางออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยการใช้โปรแกรม PSCAD Version 4.6 ในการสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และจำลองเหตุการณ์ของการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 3 ระดับ คือ 20 kA 40 kA และ 60 kA จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลระหว่าง

ระบบผลิตไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า และระบบผลิตไฟฟ้าในกรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาใช้ร่วมในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ฟ้าผ่าเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนหรือออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน รวมทั้งนำไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงของเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในบริเวณจุดเสี่ยงต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน อัตราการกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW ในลักษณะของความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในกรณีต่างๆ

1.2.3 เพื่อหาแนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาโดยการสร้างจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กมาก ที่มีอัตราการกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW โดยสามารถนำมาใช้พิจารณาผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินได้ ทั้งในกรณีของการเกิดฟ้าผ่าทางตรงและฟ้าผ่าทางอ้อมที่พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าระดับต่างๆ ในบริเวณจุดเสี่ยงของระบบผลิตไฟฟ้าที่อาจเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าได้ โดยสามารถนำข้อมูลไปใช้ร่วมในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่มีอัตราการกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไม่เกิน 10 MW

1.4.2 ออกแบบและสร้างแบบจำลองเหตุการณ์ของการฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 10/350  $\mu$ s ฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 0.25/100  $\mu$ s และ ฟ้าผ่าทางอ้อมที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 8/20  $\mu$ s พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA

1.4.3 สร้างเหตุการณ์จำลองในการเกิดฟ้าผ่าบริเวณ 2 ตำแหน่ง คือ ฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้า ด้าน DC และฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้า เฟส B ด้าน AC

1.4.4 วิเคราะห์ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส พิกัดป้องกันกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA

## 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินของบริษัทหนึ่งในจังหวัดสระบุรี ที่มีอัตรากำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW และการสร้างแบบจำลองของลำฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม PSCAD Version 4.6 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของบริษัทหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

1.5.2 สร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม PSCAD Version 4.6

1.5.3 สร้างแบบจำลองของลำฟ้าผ่าทางตรงและฟ้าผ่าทางอ้อม ที่สามารถเลือกค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าตั้งแต่ขนาด 0 -100 kA

1.5.4 วิเคราะห์ผลกระทบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าทางตรงขนาด 10/350  $\mu$ s และ 0.25/100  $\mu$ s ฟ้าผ่าทางอ้อมที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่า ขนาด 8/20  $\mu$ s ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA ในกรณีที่ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่าและกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

## 1.6 ข้อยกจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการการฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่มีอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 10 MW ซึ่งเป็นจำลองเหตุการณ์ของการเกิดฟ้าผ่าลงที่สายไฟด้าน DC และ AC รวมทั้งการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ขนาด 40 kA เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ในกรณีก่อนและภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้ทราบถึงกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

1.7.2 สามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการวางแผนออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

1.7.3 สามารถประเมินความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าในลักษณะต่างๆ

1.7.4 วางแผนการจัดการความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินได้

1.7.5 ผลของงานวิจัยสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาแนวทางป้องกันความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ที่มีอัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 10 MW ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งในส่วนของผู้ผลิตพลังงานไฟฟ้าภาคเอกชนและหน่วยงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของบทนี้ เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้นำมาใช้เป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ โดยเฉพาะทฤษฎีทางด้านฟ้าผ่าและแนวทางการป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐาน EIT Standard 2008 - 53 ในมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าที่มีผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยครั้งนี้ให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาอย่างสูงสุด และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อลดความเสี่ยงที่มีโอกาสเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพความมั่นคงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศสำหรับ ในประเทศไทยนั้นยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรง ซึ่งได้พิจารณาตามหลักการพื้นฐานของทฤษฎีและแนวทางการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้ เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ศึกษาและสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

2.1.1 Mohd Hisanuddin Bin Zamharir, 2012 [6] นำเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าของโซลาร์เซลล์ โดยวิธีการใช้เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสร้างแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1.2/50  $\mu$ s จากการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้สายเคเบิลหุ้มฉนวนและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สายเคเบิลหุ้มฉนวน พบว่า ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สายเคเบิลหุ้มฉนวนเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.64 kV ที่ระยะเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.82  $\mu$ s สำหรับระบบที่สายเคเบิลที่มีการป้องกันเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.702 kV ระยะเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.14  $\mu$ s เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสายเคเบิลหุ้มฉนวนสามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลงได้ เท่ากับ 0.938 kV และระยะเวลาสูงสุดลดลง 0.68  $\mu$ s



2.1.2 บุญเลิศ โตประดิษฐ์, 2555 [7] นำเสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน โดยพิจารณาจากความต่อเนื่องทางไฟฟ้าขณะฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน เพื่อทราบถึงผลสถานะชั่วคราวที่ปรากฏในระบบท่อด้วยโปรแกรมจำลองสถานะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ซึ่งวิธีการวิเคราะห์นั้น ใช้วิธีการเปลี่ยนคุณลักษณะของดิน ฉนวนท่อ ท่อโลหะ และสายตัวนำไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า แรงดันชั่วคราวปรากฏที่ท่อนั้นสูงขึ้นตามความยาวของท่อที่มากขึ้น สำหรับแนวทางการป้องกันได้ใช้แนวทางป้องกันตามมาตรฐาน BS 60950 ร่วมกับวงจรป้องกันท่อสุกร่อนซึ่งสามารถช่วยลดแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อได้

2.1.3 นวคุณ ไตรรัตนากิริย์, 2557 [8] นำเสนอการสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับทดสอบแรงดันคงเหลือของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Arrester) และแบบจำลองทางไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยในส่วนแรกเป็นการสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น  $8/20 \mu s$  สำหรับทดสอบกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป (Gapless Arrester) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4 โดยทำการทดสอบกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA โดยการจ่ายกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 2.5 kA 5 kA และ 10 kA ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานเชิงเส้นสองตัว ตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นหนึ่งตัว และความต้านทานไม่เชิงเส้นหนึ่งตัว และนำเสนอขั้นตอนในการหาค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบความแม่นยำกับแบบจำลองดั้งเดิมอื่น ได้แก่ แบบจำลองของ IEEE แบบจำลองของ Pinceti และแบบจำลองของ Fernandez พบว่าผลแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีเสถียรภาพและความแม่นยำที่ดีกว่าแบบจำลองดั้งเดิมอื่น

2.1.4 นิพนธ์ ชาดาสิทธิ์, 2557 [9] ได้ทำการประเมินความเสี่ยงต่ออาคารจ่ายไฟฟ้าสำหรับสนามบินของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเนื่องจากฟ้าผ่า โดยการหาพื้นที่ความเสี่ยงและการวิเคราะห์ความเสี่ยง โดยอาศัยหลักการตามมาตรฐาน IEC และคำแนะนำ ITU - T เพื่อหาแนวทางป้องกันและลดผลกระทบของความเสียหาย ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า ซึ่งอาคารจ่ายไฟฟ้าจะมีระบบไฟฟ้าทางด้านเข้าถูกเชื่อมต่อกับสถานีจ่ายไฟฟ้าหลักของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ และระบบไฟฟ้าทางด้านออกถูกเชื่อมต่อกับโคมไฟฟ้าของทางวิ่งและทางขับภายในสนามบิน จากการวิเคราะห์พบว่าจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าและพื้นที่ความเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่ามีผลต่อจำนวนครั้งของอัตราความเสียหายต่อปีและค่าระดับความเสี่ยงที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นถึงจำนวนครั้งของอัตราความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกัน

2.1.5 ยุทธนา เฟื่องฟูง, 2557 [10] นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมการประเมินความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดความเสียหาย ในกรณีเกิดวาทฟ้าผ่าลงถึงปลุกสร้างที่มีการติดตั้งระบบผลิตพลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อพิจารณาหามาตรการป้องกัน และองค์ประกอบสำหรับการหาขนาดพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม รวมทั้งมีการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์หลังจากที่มีการเลือกมาตรการป้องกันแล้ว ซึ่งวิธีการประเมินความเสี่ยงของโปรแกรมนี้อยู่บนพื้นฐานการคำนวณที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 62305 - 2 โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำให้การประเมินความเสี่ยงมีความสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้เชิงลึกในรายละเอียดของมาตรการป้องกันฟ้าผ่า เพียงแค่กดเลือกหรือกรอกข้อมูลใน โปรแกรมก็สามารถประเมินความเสี่ยงได้ พร้อมทั้งสามารถเลือกมาตรการป้องกันที่เหมาะสมทั้งแบบอัตโนมัติหรือเลือกโดยผู้ใช้งาน หลังจากนั้นก็สามารถประเมินความคุ้มค่ารายปีจากมูลค่าของรายการอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่เลือกได้

2.1.6 N.H. Zaini และคณะ, 2016 [11] ได้นำเสนองานวิจัยของผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยการสร้างแบบจำลองในเหตุการณ์ฟ้าผ่าบนระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม PSCAD จำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าใน 2 ด้าน คือ ด้าน DC และ AC โดยที่เลือกใช้หน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ช่วงเวลา 0.25/100  $\mu$ s และ 10/350  $\mu$ s ที่ค่ากระแสฟ้าผ่าในระบบขนาด 20 kA - 100 kA จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลจากค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าชั่วครู่ที่ปรากฏขึ้น ซึ่งผลจากการทำวิจัยนี้ได้นำเสนอเป็นแนวทางการวิเคราะห์ของระบบป้องกันฟ้าผ่าก่อนที่จะดำเนินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.1.7 อานนท์ ส่งแสง และคณะ, 2559 [12] นำเสนอการศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่าย พร้อมนำเสนอลักษณะการเกิดฟ้าผ่าที่สร้างการรบกวนต่อคุณภาพไฟฟ้าด้วยการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วยซึ่งก่อให้เกิดแรงดันเกินเหนี่ยวนำขึ้นในระบบจำหน่าย พร้อมนำเสนอแนวทางการปรับปรุงสายตัวนำลงดินด้วยเทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งคอนกรีตโดยทำการเชื่อมต่อสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) ไปยังแท่งหลักดินเพื่อลดอัตราการวาทไฟตามผิวย้อนกลับและทดลองผลการปรับปรุงด้วยโปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดัน 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง จากการศึกษา พบว่า การปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดแรงดันหัวเสาและสามารถลดลงได้

2.1.8 กิตติชัย ชัยเพชร, 2559 [13] ได้ทำการศึกษากรณีการเกิดวาทฟ้าผ่าด้านข้างจากฟ้าผ่าโดยตรงต่อสิ่งปลูกสร้าง สร้างแบบจำลองโดยใช้สายทองแดงขนาด 50 mm<sup>2</sup> ที่ความยาว 1 m, 2 m และ 3 m โดยแรงดันที่ใช้ทดสอบเป็นแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ 1.2/50  $\mu$ s ส่วนแกนที่ใช้เป็นแบบทรงกลมที่ระยะ 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm และ 5 mm จากการทดสอบพบว่ากรณีต่อสายทองแดงยาว 1 m,

2 m และ 3 m ขนานกับแก๊สระยะ 1 mm จะมีแรงดันเบรกควาน์ที่แก๊สเพิ่มขึ้น 90.5%, 48.4% และ 33.7% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีสายทองแดงต่อระหว่างแก๊ส กรณีนำสายทองแดงที่มีความยาวเท่ากันมาต่อขนานจำนวน 2, 3 และ 4 เส้นมาต่อขนานเข้ากับแก๊สระยะ 1 mm พบว่า เมื่อความยาวของทองแดงเป็น 1 m จะไม่มีการเบรกควาน์ที่แก๊ส

## 2.2 ทฤษฎีฟ้าผ่า

### 2.2.1 ปราบกฏการณ์ฟ้าผ่า

ปราบกฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปราบกฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยในปี ค.ศ. 1752 ได้มีการพิสูจน์ให้เห็นได้อย่างชัดเจนจาก Benjamin Franklin และ Thomas Folger ที่เมืองฟิลาเดลเฟีย ประเทศสหรัฐอเมริกาว่า ปราบกฏการณ์ฟ้าผ่า เกิดจากการสปาร์คไฟฟ้าซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ จากการค้นพบในครั้งนี้ จึงทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาหลักของการป้องกันฟ้าผ่าด้วยเสาต่อฟ้า ที่เรียกว่า Franklin rod มาจนถึงปัจจุบันนี้



รูปที่ 2.1 Benjamin Franklin และ การทดลองปราบกฏการณ์ฟ้าผ่าโดยใช้ว่าว [14]

การสะสมของประจุไฟฟ้าปริมาณมากในก้อนเมฆนั้นทำให้อ่อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 - 100 MV ซึ่งเมื่อเกิดการดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้น โลกจะทำให้เกิดเป็นวาบฟ้าผ่า ถ้าหากเกิดการดิสชาร์จภายในก้อนเมฆหรือระหว่างก้อนเมฆจะทำให้เกิดปราบกฏการณ์ฟ้าแลบ โดยโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยปราบกฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบมากกว่าฟ้าผ่า แต่ฟ้าผ่าเป็นเรื่องที่มนุษย์ในความสนใจมากกว่าเนื่องจากแกนลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K ซึ่งทำให้เกิดไฟไหม้ต่อสิ่งที่ถูกฟ้าผ่าได้ และจากการวัดค่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงได้ถึงหลายร้อย kA ซึ่งให้เกิดแรงกลบิดและแรงระเบิดได้มากมาย เป็นที่สังเกตได้ว่าที่ใดที่ถูกฟ้าผ่า

สิ่งนั้น จึงเกิดการระเบิดเสียหาย นอกจากนี้ความเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่าที่มีอันตรายสูงยังทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนต่อระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ และแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าชำรุดเสียหาย สำหรับกระแสฟ้าผ่าอีกส่วนที่ไหลลงสู่พื้นดินก็อาจทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้น เนื่องมาจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสได้ [15]

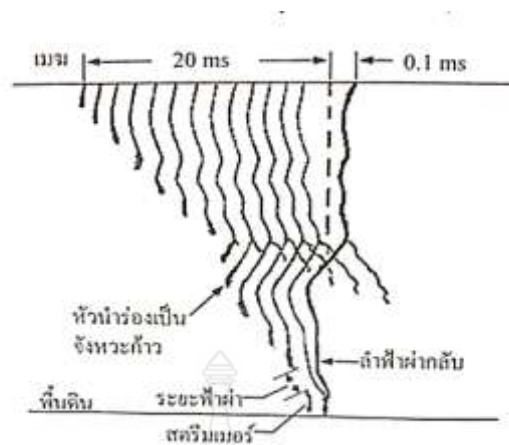
## 2.2.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นจากก้อนเมฆที่มีประจุสะสมในระดับสูง 1.5 ถึง 10 km เหนือพื้นโลก โดยที่ส่วนฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบและส่วนบนของก้อนเมฆเป็นประจุบวก โดยจุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในส่วนของกลุ่มประจุลบที่อยู่บริเวณฐานของก้อนเมฆเนื่องจากอยู่ใกล้กับพื้นโลก เมื่อเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีค่าวิกฤติ ( $E_c$ ) ในก้อนเมฆประมาณ  $10 \text{ kV/cm}$  ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก  $E_c \approx 30 \text{ kV/cm}$  ทำให้เกิดไอออไนเซชันตามหลักการเกิดคิสิกซาร์จในก๊าซ



### รูปที่ 2.2 การกระจายของประจุในก้อนเมฆ

การเกิดไอออไนเซชัน ของอากาศจะเกิดเป็น (Leader) หรือหัวนำร่อง มีทิศลงสู่พื้นโลก ในลักษณะจังหวะก้าว (Stepped Leader) แบบส้อม จะมีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 ถึง 200 เมตร เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50 m ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุด ความเร็ว 10 - 100 km/s แต่ละจังหวะที่ก้าวจะหยุดพักราว  $10 \mu\text{s}$  ถึง  $50 \mu\text{s}$  ก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไป เมื่อหัวนำร่องเข้าใกล้พื้นโลกจะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำ เช่น ที่ยอดแหลมของอาคารสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ หรือที่ OHGW เป็นต้น เกิดไอออไนเซชันเป็นสตรีมเมอร์มีความยาว 1 m ถึง 100 m วิ่งเข้าหาหัวนำร่องจนมาพบกันเกิดเป็นลำฟ้าฟ้านั่นเอง



รูปที่ 2.3 ภาพสเก็ตการขยายตัวของหัวนำร่อง [15]

### 2.2.3 ฟ้าผ่าลง ฟ้าผ่าขึ้น

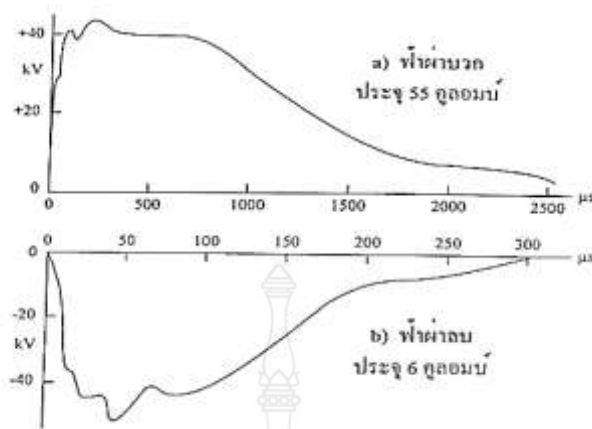
ฟ้าผ่าลง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการดิสรจของประจุภายในก้อนเมฆลงมาสู่พื้นโลก ซึ่งมีลักษณะลำแสงแตกเป็นแขนกระจายลงสู่พื้นโลกมีลักษณะรากต้นไม้อันเนื่องมาจากหัวนำร่องที่ทรูยทางลงมานั้นคืบหน้าลงมาหลายๆ ทางแล้วแต่ว่าทางใดจะขยายตัวได้ง่ายกว่า

ฟ้าผ่าขึ้น เป็นปรากฏการณ์ที่เริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆ คือ หัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจากวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างสูงๆ ในพื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 m ขึ้นไปโดยจะมีกระบวนการคืบหน้าเป็นจังหวะก้าวของหัวนำร่องในทิศทางขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ จากการสังเกตจะพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักจะเป็นผลสืบเนื่องมาจากฟ้าผ่าลง

### 2.2.4 ขั้วและรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าลบ คือ ลำฟ้าผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก แต่ถ้าหากลำฟ้าผ่านำประจุบวกลงมาจะเรียกฟ้าผ่าบวก จากข้อมูลการบันทึกในต่างประเทศพบว่า ประมาณ 80 - 85% จะเป็นลำฟ้าผ่าลบและฟ้าผ่าลบมักเป็นฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นลำฟ้าผ่าเดี่ยว ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าอาจกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น เวลาช่วงหน้าคลื่น หมายถึงเวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น หมายถึง เวลาเริ่มตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่น คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชัน ( $di/dt$ ) เป็น  $kA/\mu s$  ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า





รูปที่ 2.4 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า [15]

จากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนประจุฟ้าผ่าบวกจะมีมากกว่าประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่า และเวลาของรูปคลื่นก็ยาวกว่ามาก ถึง 9 เท่าเช่นกัน ซึ่งอธิบายได้ว่ากลุ่มของประจุบวกที่อยู่ส่วนบนของก้อนเมฆที่อยู่ห่างจากพื้นโลกเป็นระยะทางไกลกว่ากลุ่มประจุลบที่กระจายอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆใกล้กับพื้นโลก ประจุที่อยู่ห่างจากพื้นโลกมากจึงต้องสะสมประจุให้มีจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ลงมายังพื้นโลกได้ซึ่งเป็นไปตามหลักการคิซซาร์จของก้านั้นเอง

### 2.2.5 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่าจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุที่คิซซาร์จ ขึ้นอยู่กับชื่อของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าชั่วลบมีค่าสูงถึง 90 kA และชั่วบวกมีค่าสูงถึง 270 kA และจากสถิติการกระจายของกระแสฟ้าผ่าที่วัดได้จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ภาคใต้ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ระหว่างปี 1963 ถึง 1971 โดยจากราฟจะเห็นได้ว่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเฉลี่ยที่ความน่าจะเป็น 50% ชั่วลบประมาณ 30 kA สำหรับฟ้าผ่าดำแรกและฟ้าผ่าตามชั่วลบประมาณ 12 kA และเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกประมาณ 35 kA

สำหรับรูปคลื่นของกระแสในการนำมาใช้วิเคราะห์นั้น ประกอบด้วย ฟ้าผ่าดำแรก ซึ่งมีค่าฟังก์ชันเวลาของกระแส เท่ากับ  $10/350 \mu\text{s}$  และฟ้าผ่าดำต่อมามีค่าฟังก์ชันเวลาของกระแส เท่ากับ  $0.25/100 \mu\text{s}$  ซึ่งสามารถแทนด้วยสมการที่ (2.1)

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot e^{-t/\tau_2} \quad (2.1)$$

โดยที่

- $I$  = กระแสค่ายอด  
 $k$  = สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด  
 $t$  = เวลา  
 $\tau_1$  = ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น  
 $\tau_2$  = ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น

เพื่อที่จะให้ได้รูปคลื่นกระแสของลำฟ้าผ่าช่วงสั้นลำแรกและลำฟ้าผ่าช่วงล่าต่อมาสำหรับระดับป้องกันฟ้าผ่าต่างๆ ให้ใช้ค่าดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าลำแรก [16]

ค่าพารามิเตอร์ของกระแส	ระดับการป้องกัน		
	1	2	3 และ 4
กระแสค่ายอด (kA)	200	150	100
สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด	0.930	0.930	0.930
ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น ( $\mu$ s)	19.0	19.0	19.0
ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น ( $\mu$ s)	485	485	485

**ตารางที่ 2.2** ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมา [16]

ค่าพารามิเตอร์ของกระแส	ระดับการป้องกัน		
	1	2	3 และ 4
กระแสค่ายอด (kA)	50	37.5	25
สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด	0.933	0.933	0.933
ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น ( $\mu$ s)	0.454	0.454	0.454
ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น ( $\mu$ s)	143	143	143



กระแสฟ้าผ่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย ค่ายอด (Peak Value) เวลา และความชันหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าโดยได้พิจารณาจากวิธี Double Exponential Model ซึ่งใช้สมการดังนี้

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2)$$

โดยที่

$I$  = กระแสค่ายอด

$\alpha$  = เวลาคงตัวของหน้าคลื่น

$\beta$  = เวลาคงตัวของหางคลื่น

$t$  = เวลา

Wang Jia Zhang Xiaoqin (2006) ได้เสนอแนวทางในการสร้างสมการฟ้าผ่าโดยเพิ่ม  $A$ -factor เข้าไปในสมการดังนี้ [17]

$$i(t) = AI(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ในการคำนวณสมการฟ้าผ่า  $A$ -factor

รูปคลื่นฟ้าผ่า	$A$	$\alpha$ (s)	$\beta$ (s)
0.25/100 $\mu$ s	1.002	$7.00 \times 10^3$	$3.40 \times 10^7$
1.2/50 $\mu$ s	1.037	$1.47 \times 10^4$	$2.47 \times 10^6$
2.6/50 $\mu$ s	1.058	$1.50 \times 10^4$	$1.86 \times 10^6$
10/350 $\mu$ s	1.025	$2.05 \times 10^3$	$5.64 \times 10^5$

จากค่า  $A$ ,  $\alpha$  และ  $\beta$  ที่เลือกมาใช้แทนค่าในสมการที่ (2.3) เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันรูปคลื่นค่ากระแสฟ้าผ่ากำหนดตามมาตรฐานของประเทศจีนในด้านมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่า GB50057 - 94 และด้านมาตรฐานอุตสาหกรรมการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ DL/T620 - 97

## 2.2.6 ฟาผ่าซ้ำหลายลำ

เนื่องจากภายในก้อนเมฆอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง เมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อน ก็จะดิสชาร์จลงสู่พื้น โลกเป็นลำฟาผ่าแรก เมื่อกลุ่มประจุแรกดิสชาร์จไปหมดแล้วจะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิสชาร์จลงสู่พื้น โลกตามแนวลำฟาผ่าลำแรก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอากาศในแนวลำฟาผ่าวิ่งลงมาก่อนนั้นยังคืนตัวสภาพนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากมีไอออนอยู่ จึงทำให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นดิสชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้กลายเป็นฟาผ่าซ้ำนั่นเอง ฟาผ่าซ้ำจะมีช่วงเว้นต่อเนื่องระหว่างครั้งประมาณ 5 -30 ms ลักษณะของลำฟาผ่านี้จะไม่มีการแตกแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจิ้งหะก้าวของหัวนำร่อง เวลาช่วงหน้าคลื่นของฟาผ่าซ้ำ จะมีความชันสูงมาก อาจถึง 120 kA/ $\mu$ s ซึ่งความชันของคลื่นกระแสฟาผ่าลำแรกจะมีค่าเพียง 32 kA/ $\mu$ s และความชันเฉลี่ยประมาณ 12 kA/ $\mu$ s จากการบันทึก พบว่าการเกิดฟาผ่าซ้ำหลายๆ ครั้ง จะมีหรือไม่มีขึ้นอยู่กับภูมิประเทศในประเทศโซนหนาวจะมีฟาผ่าลำเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศโซนร้อนจะมีจำนวนฟาผ่าซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง เช่น ในประเทศอังกฤษจะมีฟาผ่าแต่ละครั้ง 1-2 ลำฟาผ่า ในแอฟริกาฟาผ่าซ้ำเฉลี่ย 4 ลำฟาผ่า และในสหรัฐอเมริกาพบว่า มีฟาผ่าซ้ำถึง 26 ลำต่อวาบฟาผ่า 1 ครั้ง เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ฟาผ่าซ้ำหลายลำ [18]

## 2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่า

### 2.3.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางความร้อน

ผลทางความร้อน มีผลทำให้เกิดเพลิงไหม้กับสิ่งที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าจากฟ้าผ่าโดยลำแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น cm และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{A-K} Q \quad (2.4)$$

โดยที่

$W$  = พลังงานฟ้าผ่า

$U_{A-K}$  = แรงดันตกคร่อมแอโนด-แคโทดตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบ

$Q$  = ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมป์ - วินาที)

ดังนั้นในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า ซึ่งต้องใช้เสาล่อฟ้าเป็นตัวล่อหรือรับให้ฟ้าลง และมีสายตัวนำลงดินที่ทำหน้าที่เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือ สายตัวนำลงดินจะต้องมีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดใหญ่

### 2.3.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางแรงกลบิตหรือแรงระเบิด

แรงกลบิตหรือแรงระเบิดมีผลทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทลายลงได้ ลักษณะของแรงกลระเบิดที่เกิดขึ้นนั้น มีสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นกับตัวนำนั้น เป็นแรงดึงคูดหรือแรงผลักร ขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสองของ  $i$  เป็นสัดส่วนกลับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง  $d$  นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำจะคำนวณได้จากสมการ

$$(Fdt)' = \frac{10^{-7}}{d} \int i^2 dt \frac{N \text{ sec}}{m} \quad (2.5)$$

ถ้าลำฟ้าผ่าลงตั้งฉากกับแนวของตัวนำจะเกิดแรงอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำในแนวต่อตรง  
ออกไปของลำฟ้าผ่า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\int F dt' = 10^{-7} \int i^2 dt N \text{ sec} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $i^2 dt$  เป็น  $A^2 \text{ sec}$

ถ้ากระแสไหลในตัวนำที่เป็นบ่วงหรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายหรือยัด  
วงกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่สอง เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมากทำให้อากาศรอบๆ ลำฟ้าผ่า  
ขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายไปรอบ  
ลำฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าร้องนั่นเอง สำหรับในกรณีที่ฟ้าผ่าลงวัสดุที่เป็น  
ฉนวนไฟฟ้า กระแสจะวิ่งผ่านไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุดถ้ามีความชื้นอยู่ในวัสดุนั้น  
จะเปลี่ยนเป็น ไอ เกิดความดัน อาจมีผลทำให้ระเบิดได้

### 2.3.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าเกิดแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นเสียดต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า  
ในระบบ เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสาร และเกิดแรงดันช่วงก๊าวที่เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต ผลทาง  
ไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ ดังนี้

#### 2.3.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดฟ้าผ่าจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร  
ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดัน  
เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดสปาร์คได้

#### 2.3.3.2 แรงดันสปาร์คด้านข้าง

ถ้ากระแสไฟฟ้าผ่า  $i$  ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ  $L$  และมีความต้านทาน  
ของดิน  $R_c$  จะทำให้แรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta U = R_c i + L \frac{di}{dt} \quad (2.7)$$

โดยที่  $di/dt$  คือความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ถ้าความต้านทานของรากสายดินหรือความเหนียวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า  $\Delta U$  นี้ มีค่าสูงอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์กด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์กด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้

#### 2.3.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ถ้าฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า  $I$  วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสถียรจิมพีแดนซ์  $Z_w$  จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ผ่าลง มีค่าเท่ากับแรงดันสูงคลื่นจรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

#### 2.3.3.4 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งกำลังแรงสูงแต่ก็มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้าน ภายในอาคาร สำนักงาน หรือโรงงานเพราะอุปกรณ์แรงต่ำเหล่านี้ ความเป็นฉนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบๆ kV ได้

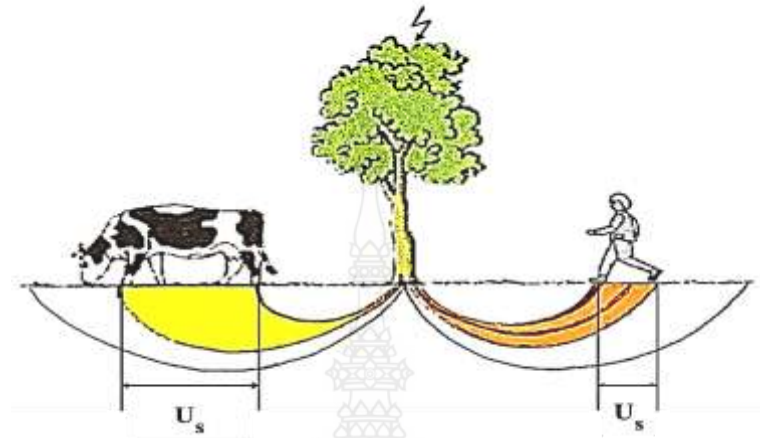
#### 2.3.3.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงที่ที่อยู่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น ลี้กก่อสร้างหรืออาคารสูงต้นไม้สูงเด่น หรือคนที่ยืนอยู่ในที่โล่ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้นมีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในกลางที่แจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นไม้เดี่ยวกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนต้นไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

#### 2.3.3.6 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส เป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์ เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงก้าวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายและขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 m หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่าแรงดันช่วงก้าว ส่วนแรงดัน

สัมผัส หมายถึงความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือโครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่รากสายดิน ที่คน  
มีโอกาสสัมผัสถึงดินที่ยืนอยู่



รูปที่ 2.6 แรงดันช่วงก้าว  $U_s$  (Stepped Voltages) [19]

## 2.4 มาตรการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า

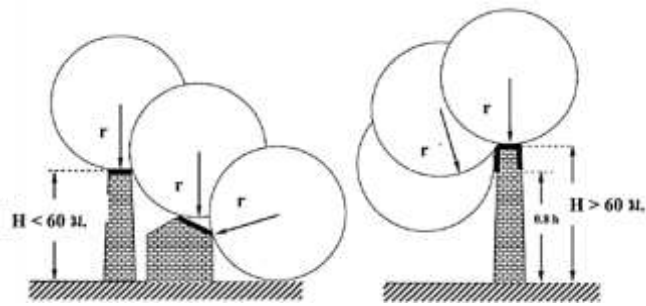
### 2.4.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ปัจจุบันได้มีการร่างมาตรฐานป้องกันฟ้าผ่าโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย คือ วสท.  
2003-43 ร่างตามมาตรฐาน IEC 61024-1-2 ซึ่งได้แนะนำวิธีติดตั้งตัวนำล่อฟ้า แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ  
วิธีทรงกลมกลิ้ง วิธีมุมป้องกัน และ วิธีตาข่าย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.4.1.1 วิธีทรงกลมกลิ้ง (Rolling Sphere)

วิธีนี้จะใช้ทรงกลมเหมือนลูกบอลที่เหมือนกับการทาสีแล้วกลิ้งไปตามสิ่งปลูก  
สร้างกลิ้งไปบนส่วนของอาคาร ในการออกแบบจึงต้องติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าชนิดที่เป็นหลักล่อ  
ฟ้าหรือสายตัวนำจึงเสียก่อน และกลิ้งลูกบอล ส่วนใดของอาคารที่ผิวของลูกบอลสัมผัสหรือส่วนที่  
อาคารเป็อนสีจะถือว่าเป็นส่วนที่ไม่ได้รับการป้องกัน ซึ่งวิธีนี้มักใช้กับอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มี  
โครงสร้างซับซ้อน

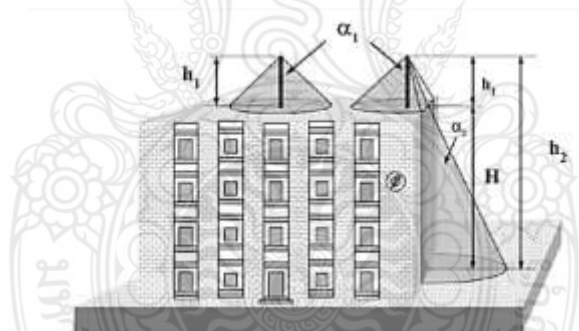




ภาพที่ 2.7 วิธีทรงกลมกลิ้ง [20]

#### 2.4.1.2 วิธีมุมป้องกัน (Protective Angle)

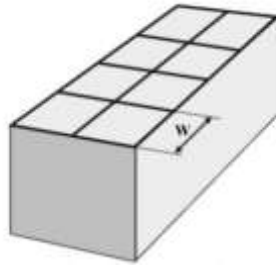
วิธีที่กำหนดมุมสำหรับการป้องกันไว้ซึ่งมีลักษณะพื้นที่ของการป้องกันจะเป็นรูปทรงกรวยจะปลอดภัยจากฟ้าผ่า เหมาะสำหรับสิ่งปลูกสร้างง่าย ๆ ต้องติดตั้งโดยให้แท่งตัวนำล่อฟ้าครอบคลุมส่วนที่ต้องการป้องกัน มุมป้องกันจะแปรผันตามระดับการป้องกันและความสูงของตัวนำล่อฟ้าวิธีมุมป้องกันนี้เหมาะที่จะใช้กับตัวนำล่อฟ้าแบบแท่งตัวนำ และแบบตัวนำจึงเท่านั้น



ภาพที่ 2.8 วิธีมุมป้องกัน [20]

#### 2.4.1.3 วิธีตาข่าย (Mesh Size)

วิธีนี้เป็นการใช้ตัวนำล่อฟ้าแนวราบจึงบนส่วนของอาคารส่วนที่สูงที่สุดการติดตั้งที่ให้การป้องกันที่ดี จะต้องติดตั้งตัวนำแนวราบโดยรอบอาคาร



รูปที่ 2.9 วิธีถ่าย [20]

#### 2.4.2 การป้องกันฟ้าผ่าอาคารและสิ่งปลูกสร้างแบบฟาราเดย์

อาคารและสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในที่แจ้งแม้จะมีความสูงไม่มากก็ตามแต่สูงเด่น คือ สูงกว่าสิ่งอื่น ในบริเวณใกล้เคียง เช่น อาคารสูง มีอัตราเสี่ยงต่อการถูกฟ้าผ่าสูง ควรจะได้มีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เรียกว่า ระบบสายล่อฟ้า ซึ่งเป็นระบบที่ล่อให้ฟ้าผ่าลง ณ จุดที่กำหนดให้ฟ้า หากจะเกิดฟ้าผ่าขึ้นในบริเวณนั้น แล้วมีทางนำให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ตามมา ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบฟาราเดย์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ตัวล่อฟ้า ตัวนำลงดิน และ รากสายดิน

##### 2.4.2.1 ตัวล่อฟ้า

ตัวล่อฟ้าอาจเป็นแท่งตัวนำหรือสายตัวนำยึดไว้บนยอดสูงสุดของสิ่งปลูกสร้างหรืออาคารหรือสิ่งที่ต้องการป้องกัน ตัวนำล่อฟ้านี้มักนิยมทำปลายยอดให้แหลม เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้นที่มีค่าสูงกว่าที่อื่นในบริเวณใกล้เคียงสร้างสตริมเมอร์ได้ง่าย ทำหน้าที่ล่อฟ้าผ่าลงที่ตัวนำล่อฟ้านั้นถ้าหากจะเกิดฟ้าผ่าขึ้นในย่านนั้น ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวนำล่อฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งปลูกสร้างส่วนบนสุด เช่น หลังคาทรงแหลม หรือหลังคาแบบราบ มีปล่องไฟหรือโครงสร้างอื่นๆ

##### 2.4.2.2 ตัวนำลงดิน

ตัวนำลงดินจะต่อทางไฟฟ้าอย่างดีกับตัวนำล่อฟ้า เมื่อฟ้าผ่าลงบนตัวนำล่อฟ้าแล้วกระแส จะไหลลงสู่พื้นดินผ่านตัวนำลงดินกระจายออกไปในดินอย่างรวดเร็วผ่านทางรากดิน ตัวนำลงดินซึ่งต่ออยู่ระหว่างตัวนำล่อฟ้ากับรากสายดินจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ มีค่าความเหนี่ยวนำน้อย ฉะนั้นในบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้สายตัวนำลงดินหลายๆ เส้นขนานกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างยาวของตัวอาคาร ถ้าตัวอาคารยิ่งกว้างยาวมากก็ต้องใช้ตัวนำลงดินมากขึ้น และจะต้องต่อเอมโงถึงกันในช่วงกลางของความสูงด้วย ถ้าอาคารนั้นสูงมากๆ เพื่อกันมิให้เกิดสปาร์คด้านข้างอันเนื่องจาก

แรงดันเหนี่ยวนำความยาวโดยประมาณของตัวนำลงดินที่จะต้องการเชื่อม โยงต่อกันอาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$l \leq 20d \quad (2.8)$$

โดยที่

- $l$  = ความยาวของสายตัวนำลงดินเป็นเมตร  
 $d$  = ระยะช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็นโลหะ ฝาผนังเหล็กบับไดเหล็ก สายพานโลหะ สายเคเบิล ท่อก๊าซเย็น (ท่อโลหะ) เข้ากับตัวนำลงดินหรือระบบป้องกันฟ้าผ่า

#### 2.4.2.3 รากสายดิน

รากสายดินเป็นตัวนำฝังอยู่ในดิน เช่น แท่งทองแดงหรือแท่งเหล็กชุบสังกะสี หรือเหล็กหุ้มด้วยทองแดง เพื่อช่วยให้ความต้านทานของระบบสายดิน หรือของระบบป้องกันฟ้าผ่ามีค่าต่ำ กระแสฟ้าผ่าจะได้ไหลกระจายออกไปได้สะดวกและรวดเร็ว ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้รากสายดินจำนวนหลายอันและฝังให้ลึกลงไปใ้ดินมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดิน ขนาดของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยคำนึงถึงหลักสองประการ คือ ความต้านทานของระบบสายดินจะต้องไม่ทำให้เกิดสปาร์คด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานดังกล่าวและจะต้องไม่ทำให้เกิดสปาร์คด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานดังกล่าวและจะต้องไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์ช่วงก้าว (ประมาณ 1 m) บนพื้นดินรอบๆ อาคารซึ่งเรียกว่า แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส เกินกว่าที่กำหนด เพราะจะทำให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เดินอยู่ในบริเวณนั้นขณะเกิดฟ้าผ่า เพื่อมิให้เกิดสปาร์คด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานของรากสายดิน  $R_c$  ค่าความต้านทานจะต้องมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ

$$R_c \leq 5d \quad (2.9)$$

โดยที่

- $d$  = ช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็นโลหะอื่นที่ต่อเนื่องกัน หน่วยเป็นเมตร

## 2.4.2 อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทางไฟฟ้า

กั๊บดักลัดวงจรหรือกั๊บดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินลัดวงจรฟ้าผ่า และแรงดันเกินลัดวงจรสวิดซึ่ง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้ารีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย กั๊บดักลัดวงจรต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน คือ อยู่ระหว่างเฟสกับดิน กั๊บดักลัดวงจรจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น มี 2 ชนิด ดังนี้

### 2.4.2.1 กั๊บดักลัดวงจรชนิด SiC

กั๊บดักลัดวงจรชนิด SiC จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทาน  $R_{non}$  สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคของกั๊บดักลัดวงจร ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั๊บมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้งานที่แรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินลัดวงจร เมื่อได้รับแรงดันเกินลัดวงจร สปาร์กแกปจะเกิดเบรกดาวน์โดยเร็วที่สุด แรงดันที่กั๊บดักลัดวงจรเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่า แรงดันสปาร์กผ่าน (Sparkover Voltage) ส่วนแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกั๊บดักลัดวงจร เรียกว่า แรงดันเหลือ (Residual Voltage)

### 2.4.2.2 กั๊บดักลัดวงจรชนิด MO (ZnO)

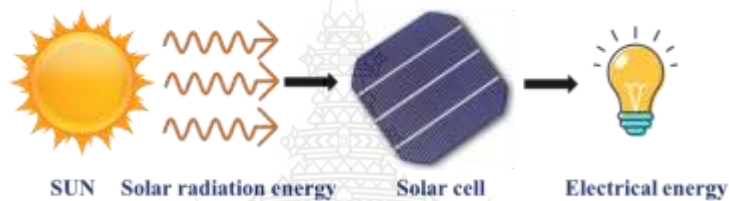
กั๊บดักลัดวงจรชนิดออกไซด์โลหะ (Metal Oxide) จะใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวนโดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของแท่ง ZnO เป็นตัวกำหนดขนาดกระแส หรือพลังงานลัดวงจรที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูงเป็นตัวกำหนดแรงดัน

## 2.5 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การพัฒนาแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ เพื่อชดเชยการใช้น้ำมันเป็นงานที่ทำหายและสำคัญมากของนักวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน ในจำนวน โครงการผลิตพลังงานทดแทนทั้งหมดกล่าวได้ว่า โครงการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์นั้นปราศจากมลภาวะเป็นพิษ มีแหล่งพลังงานอยู่ทั่วไปและไม่สิ้นสุด ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานขนาดมหึมา พลังงานที่ดวงอาทิตย์สร้างขึ้นประมาณ  $3.8 \times 10^{23}$  kW แต่เนื่องจากระยะทางที่ห่างจากโลกเราถึง 93 ล้านไมล์ ทำให้พลังงานที่ส่งมายังโลกลดน้อยลงพลังงานแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงโลกประมาณ  $3.8 \times 10^{14}$  kW ถูกดูดซับโดยบรรยากาศและพื้นโลกประมาณ  $1 \times 10^{10}$  kW จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มีมากกว่าพลังงานที่มนุษย์ใช้รวมกันทั้งโลกประมาณ 10,000 เท่า สำหรับประเทศไทยพื้นที่เกือบทั้งหมดสามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ  $4.5 \text{ kW/hr/m}^2/\text{day}$  ดังนั้นใน

พื้นที่ 1 km<sup>2</sup> สามารถตั้งระบบผลิตไฟฟ้า พื้นที่ประมาณ 1,500 km<sup>2</sup> สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า พื้นที่ประมาณ 1,500 km<sup>2</sup> หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.3% ของประเทศเท่านั้น [21]

Photovoltaic (PV) หมายถึง ขบวนการผลิตไฟฟ้า จากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานดังกล่าว คือ สารกึ่งตัวนำเมื่อนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเรียกว่า Solar Photovoltaic Cell หรือ Solar Cell นั่นเอง สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาผลิตเป็น Solar Cell ได้แก่ ซิลิคอน ที่มีรูปผลึกและไม่มีรูปผลึก ได้แก่ แกลเลียมอาเซไนด์ อินเดียมฟอสไฟด์ แกลเมียมเทลลูไรด์ และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ เป็นต้น



## รูปที่ 2.10 ขบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การค้นพบการตอบสนองทางไฟฟ้าเมื่อมีแสงกระทบบนวัสดุถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Edmond Becquerel ใน ค.ศ. 1839 เขาได้สังเกตเห็นว่าเมื่อมีแสงตกกระทบบนด้านหนึ่งของ Electrochemical Cell แล้วจะมีการผลิตกระแสไฟฟ้า เพิ่มขึ้นต่อจากนั้นได้มีการผลิต Selenium Photovoltaic Cell ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1883 ในปี ค.ศ. 1905 มีการค้นพบว่าจำนวนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของวัสดุที่มีความไวต่อแสงจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มและความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบนวัสดุนั้นๆ

แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้ เนื่องจากรังสีของดวงอาทิตย์ประกอบด้วยอนุภาคของพลังงานที่เรียกว่า โพรตอน (Photon) โพรตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์จนอยู่ในสถานะ Excited State เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากโพรตอนแล้วจะกระโดดออกจากอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่อิเล็กตรอนมารวมกันและเคลื่อนที่ผ่านเรียกว่า “ขั้วลบ” และขั้วที่อยู่ตรงข้ามจะเรียกว่า “ขั้วบวก” เมื่อขั้วทั้ง 2 ถูกต่อด้วยหลอดไฟฟ้าก็จะทำให้มีแสงสว่างเกิดขึ้นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน คือ สารซิลิคอน สาเหตุเพราะมีราคาต่ำและหาได้ง่ายในธรรมชาติ



สารซิลิคอนบริสุทธิ์ ปกติจะมีความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำมาก เพราะอิเล็กตรอนไม่มีการเคลื่อนที่ในบอนด์ แต่เมื่อใช้วิธีการโด๊ปด้วยสารโบรอนจะทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะ โบรอนจะทำตัวเป็นตัวนำพาประจุ ซึ่งเป็นประจุบวก คือ ไม่มีอิเล็กตรอนแต่จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่า Gaps หรือ โฮล (Holes) ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจับคู่ด้วย ในโครงสร้างของรูปผลึกสารซิลิคอน เมื่อผ่านขบวนการนี้แล้วเรียกว่า P-Type การโด๊ปอีกแบบหนึ่งโดยใช้สาร ฟอสฟอรัส สารซิลิคอน ที่ผ่านขบวนการโด๊ปแล้วเรียกว่า N-Type ซึ่งหมายความว่า ฟอสฟอรัส จะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอน หรือประจุลบเหมือนกับในโลหะทั่วไป

ซิลิคอนเกือบทั้งหมดในเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่เป็น P-Type ในขณะที่ผิวส่วนหน้าของเซลล์ด้านที่แสงตกกระทบ จะเป็นเพียงชั้นบางๆ เป็นแบบ N-Type รอยต่อที่อยู่ระหว่างชั้นทั้ง 2 เรียกว่า PN Junction ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะจะเป็นบริเวณที่มีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่านและทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นระหว่าง Junction ในส่วนของซิลิคอนที่เป็น N-Type นั้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ที่อุณหภูมิของห้อง ในขณะที่ซิลิคอนส่วนที่เป็น P-Type มีส่วนที่เรียกว่า โฮล คือส่วนที่อิเล็กตรอนขาดหายไป สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิของห้องเช่นกัน เมื่อประจุเหล่านี้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ PN Junction จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างรอยต่อบนสารกึ่งตัวนำก็จะเกิดการผลิตประจุอิเล็กตรอนอิสระและโฮลขึ้นอย่างมากมาย มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง PN Junction แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งก็คือการเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง ในการผลิตเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ได้มีการปรับปรุงใน 2 ลักษณะ คือ ให้นำสัมผัสโลหะเชื่อมติดกับผิวด้านหน้าของเซลล์ เพื่อที่จะรวบรวมประจุโดยไม่มี การบดบังแสงที่มากตกกระทบมากนัก ลักษณะสุดท้าย คือการเคลือบสารลดการสะท้อนที่ด้านหน้าของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงคุณสมบัติเด่นของสารเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน คือ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 0.5 V ไม่เกิดเสียงในขณะผลิตกระแสไฟฟ้าไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวจึงไม่มีการสึกหรอคงทน มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถ้ามีการป้องกันความชื้นที่ดี

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนที่ 1 ซิลิคอนชนิด N ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการโด๊ปด้วยสารฟอสฟอรัส ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ N-Type ซิลิคอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการโด๊ปด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเมื่อซิลิคอนทั้ง 2 ชนิดมาประกบกันด้วยจึงทำให้เกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

ในสถานะที่ยังไม่มีแสงแดดซิลิคอนชนิด N ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอนแต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อยด้านหน้าของ ชนิด N จะมีเมนูโลหะ เรียกว่า



Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนส่วน ชนิด P ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโอสแต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ ชนิด P ซิลิคอนจะมีโลหะ เรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโอส เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบแสงอาทิตย์ จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน และ โอสทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังงานสูงพอทั้ง อิเล็กตรอนและ โอสจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กับอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้นชนิด N และ โอสจะวิ่งไปยังชั้น ชนิด P อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และ โอสวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการ ต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจรก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและ โอสจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

วัสดุสำคัญ ที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ได้แก่สารซิลิคอน ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิพในคอมพิวเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารซึ่งไม่มีพิษมีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีราคาถูกทน และเชื่อถือได้วัสดุชนิดอื่นสามารถนำมาผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ หรือ แคดเมียมเทลลูไรด์ แต่ยังมีราคาค่อนข้างสูงหรือ ยังไม่มีการพิสูจน์ว่า สามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า 20 ปี ข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน คือ กรรมวิธีการเตรียมให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปของสารที่พร้อมทำเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาแพงและ แดกหักได้ง่าย เมื่อถึงขั้นตอนสุดท้ายเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ อะตอม เรียงกัน เป็นแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline การเตรียมสาร ซิลิคอนชนิดนี้ เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนมาหลอมละลายแล้วทำให้เกิดหารจับตัวเป็นผลึกเล็กๆ จากนั้นจะขยายขนาดขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นแท่งผลึก นำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยเลื่อยตัดเพชร จากนั้นเป็นขบวนการทำให้ผิวให้เรียบโดยใช้สารละลายอัลคาไลน์การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกวิธี หนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายถูกกว่าวิธีแรกคือการเทสารละลายซิลิคอนลงในแบบพิมพ์เมื่อสารละลายซิลิคอน แข็งตัว ก็จะเป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (Polycrystalline) ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและ แบบผลึกรวมสังเกตได้จากแบบผลึกรวมจะเห็นหน้าผลึกหลายๆ หน้าในแผ่นเซลล์ ในขณะที่แบบ ผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นสีเดียวคือสีน้ำเงินเข้มเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวมนี้จะให้ประสิทธิภาพ ต่ำกว่าผลึกเดี่ยว อย่างไรก็ตามเซลล์ทั้ง 2 ชนิด มีข้อเสีย คือแตกหักง่าย

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่ง คือ การนำเทคโนโลยีการเคลือบสารซิลิคอนที่เป็น พิล์มบาง (Thin Film) บนแผ่นแก้ว หรือแผ่นโลหะสารซิลิคอนที่ใช้เป็นแบบไม่มีรูปผลึกหรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำกว่า 2 แบบแรก แต่ปัจจุบันได้มีการนำ เทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการผลิต ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงและเพิ่มประสิทธิภาพ

ขึ้นด้วย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายชั้น (Triple Junction Structure) เป็นต้น ข้อดีของเซลล์แบบอะมอร์ฟัส คือ มีน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้โดยไม่แตก

ในมุมมองของสถาปนิกยังให้ความสำคัญต่อความความงามของวัสดุที่ทำเซลล์อีกด้วย เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวจะเป็นสีน้ำเงินและเป็นเนื้อเดียวกันแบบผลึกรวมมีสีน้ำเงินเหมือนกันแต่ต่างกันที่ลวดลายหน้าผลึก ส่วนเซลล์แบบแผ่นบางไม่มีรูปผลึกจะมีสีน้ำตาลเหมือนกับที่ใช้ในเครื่องคิดเลขข้อจำกัดเหล่านี้ ผู้ผลิตบางรายได้พยายามที่จะเปลี่ยนสีของเซลล์นั้นอาจทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงที่ตกกระทบสูงขึ้นมีผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลง

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Modules) แรงแเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เดี่ยวจะมีค่าต่ำมากการนำมาใช้งานจะต้องนำเซลล์หลายเซลล์ มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงแเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้น เซลล์ที่นำมาต่อกันในจำนวนและขนาดที่เหมาะสมเรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี และยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์อีกด้วยแผงเซลล์จะต้องมีการป้องกันความชื้นที่ดีมากเพราะจะต้องอยู่กลางแจ้งเป็นเวลายาวนานในการประกอบจะต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคน และ อีวีเอ (Ethylene Vinyl Acetate) เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่บางครั้งก็ไม่มีควมจำเป็นถ้ามีการเสริมความแข็งแรงของแผ่นกระจกให้เพียงพอ ซึ่งสามารถทดแทนการทำกรอบได้เช่นกัน ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (Laminate) ซึ่งสะดวกในการติดตั้ง

เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ จะทำให้เกิดแรงแเคลื่อนไฟฟ้าได้ 0.5 V (DC) โดยไม่ขึ้นกับขนาดของเซลล์ส่วนกระแสที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์ เช่น เซลล์ที่มีพื้นที่  $4 \times 4 \text{ in}^2$  จะให้กระแสประมาณ 3 A กำลังผลิตประมาณ 15 W ในกรณีที่ต้องการให้แรงแเคลื่อนไฟฟ้าสูงขึ้นทำได้โดยการต่อเซลล์กันแบบอนุกรม (ขั้วบวกต่อเข้ากับ ขั้วลบของอีกเซลล์หนึ่ง) แต่ถ้าต้องการเพิ่มกระแสต่อกันแบบขนาน (ขั้วบวกต่อกับขั้วบวกของอีกเซลล์) เซลล์ภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีขั้วต่อที่เป็นบวกและขั้วลบ ต่อกันแบบอนุกรมแล้วต่อรวมออกมานอกแผงเซลล์โดยทั่วไปแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายในท้องตลาดจะมีแรงแเคลื่อนสูงสุดประมาณ 21-22 V

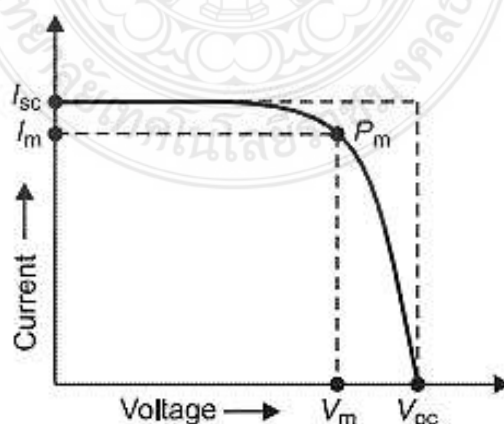
ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) สิ่งหนึ่งที่น่าสนใจของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือกำลังผลิตที่สามารถเพิ่มโดยการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้วยกันเป็นชุดหรือ (Array) ภายในชุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหลักการต่อ 2 วิธี คือ การเพิ่มแรงแเคลื่อนไฟฟ้าต่อแบบอนุกรม ต้องการเพิ่มกระแสให้ต่อแบบขนาน

รวมจะมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยทั่วไป ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จนผลิตไฟฟ้ากระแสตรงก่อน ถูกแปลงให้เป็นกระแสสลับ 220 V โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เครื่อง

แปลงกระแสจะต่อตรงเข้ากับระบบของบ้าน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถใช้ได้ทันทีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง มีแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้ากระแสตรง 255 V (ชนิดผลึกเดี่ยว) และ 240 V (ชนิดอะมอร์ฟัส) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในบางกรณีสถานที่ที่ไม่ต้องการใช้ไฟฟ้ามานัก ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไม่ถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ยังคงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงเคลื่อนต่ำเพื่อใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมพลังงานที่ผลิตได้จะเก็บไว้ในแบตเตอรี่ขนาด 12 V ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไป จะถูกออกแบบให้สามารถประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้โดยตรงถึงแม้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละแผงประมาณ 21-22 V แต่เมื่อใช้งานจริงแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะลดลงเหลือ 16-17 V เท่านั้น ซึ่งเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ทั่วไป ดังนั้นเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ชาร์จแบตเตอรี่ จึงไม่จำเป็นต้องนำแผงมาต่อกันแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หากถูกบดบังจากร่มเงา แม้เป็นพื้นที่เพียงเล็กน้อยก็ตามแต่ก็มีผลต่อพลังงานที่ผลิตอย่างมาก การต่อแบบอนุกรมของตัวเซลล์ภายในนั้น หมายถึง การที่เซลล์แต่ละเซลล์ยอมรับให้กระแสไหลผ่านได้แต่เมื่อเซลล์ๆ หนึ่งถูกบดบังไม่เพียงแต่เซลล์ๆ นั้น ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้แล้ว แต่ยังเป็นอุปสรรคต่อการไหลผ่านของไฟฟ้าในวงจรอีกด้วย ดังนั้นการถูกบดบังแม้จะเป็นเซลล์เพียงเซลล์เดียวก็ตาม แต่ก็มีผลเหมือนกับการถูกบดบังทั้งแผงเซลล์เลยทีเดียว ซึ่งผลกระทบนี้นี้สามารถลดได้ถ้ามีการต่อระบบแบบขนาน

## 2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V Curve ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์หมายถึงกระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟในแกน Y และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าแทนด้วยเส้นกราฟในแกน X



ภาพที่ 2.11 กราฟ I-V Curve [22]

I-V Curve มาตรฐานที่ใช้สำหรับการหาค่ากำลังผลิตสูงสุด หรือ  $W_p$  (Peak Watts) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้มาจากทดสอบในสภาวะมาตรฐานที่กำหนดโดยใช้แสงส่องสว่างมาตรฐาน (Solar Simulator) ที่อุณหภูมิของเซลล์คงที่  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในการสร้าง I-V Curve สิ่งแรกที่ต้องวัดก็คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) ที่ไม่มีการต่อโหลด เราเรียกว่า Open Circuit Voltage จะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในแกน X (V) เพราะไม่มีกระแสไหลผ่านจุดทุกจุดเข้าด้วยกันจะเกิดเป็น I-V Curve เมื่อต่อโหลดที่มีค่าต่างๆ กัน ค่าของกระแสและแรงเคลื่อนจะถูกบันทึกเก็บไว้ เมื่อต่อภายใต้สภาวะเฉพาะของ Irradiance และอุณหภูมิต่างๆ กัน สิ่งที่น่าสนใจที่สุดก็คือ กำลังงานสูงสุด (Maximum Power) ที่ได้ในแต่ละภายใต้สภาวะนั้นๆ ในทางไฟฟ้ากำลังงานที่ได้มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt) ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า สำหรับกำลังงานสูงสุดจะถูกแทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่มากที่สุดภายใต้เส้น I-V Curve โดยจุดสัมผัสที่อยู่บนเส้น Curve เรียกว่า Knee ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์สูงสุด ( $W_p$ ) หรือ Peak Watt ค่านี้จะถูกระบุไว้ในข้อกำหนดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต ต่างกับการจ่ายระบบไฟฟ้าจากดีเซลที่เป็นกระแสสลับ 230 V ไม่มีการจำกัดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ แต่ถ้าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้กระแสแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็จะตกจึงมีข้อจำกัดในการใช้ (จากการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อธิบายไว้ในตอนต้น จะเห็นได้ว่าโปรตอนในแสงแดดถูกดูดซับโดยเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดตัวพาประจุ (Charge Carrier) 1 คู่ ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงขึ้นกับปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์โดยตรง

ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกทำให้เกิดการลัดวงจร โดยใช้แอมป์มิเตอร์ ค่าที่วัดได้ Short Circuit ซึ่งจะให้ค่าบนแกน Y(I) เพราะว่าเป็นในสภาวะการณืเช่นนั้นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดหมายเหตุการทำให้เกิดการลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับแผงเซลล์

ข้อกำหนดของกำลังผลิตสูงสุด (The Peak Power Specification)  $W_p$  หมายถึง กำลังผลิตสูงสุด(Peak Watt) ที่ใช้วัตต์กำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์ภายใต้สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) กำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ที่แผงนั้นได้จาก I-V Curve ที่ทดสอบในสภาวะมาตรฐาน โดยกำหนดความเข้มของแสงตกกระทบที่  $1,000\text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิของเซลล์  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  กำลังผลิตสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จะสัมพันธ์กับความเข้มของแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์ เป็นสำคัญในการใช้งานเพื่อให้เกิดกำลังงานสูงสุดจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อพ่วงกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า Maximum Power Point Tracking (MPPT) คือ เป็นตัวที่กำหนดจุดทำงานแผงเซลล์ หรือชุดแผงเซลล์ที่จุดให้กำลังงานสูงสุด



จาก I-V Curve ซึ่งชุด MPPT นี้สามารถใช้งานได้โดยตรงกับปั๊มน้ำประจุแบตเตอรี่และเครื่องแปลงกระแส (Inverter) ซึ่งเครื่องแปลงกระแส ที่ออกแบบอย่างดีจะมีอุปกรณ์ MPPT อยู่ในเครื่องแล้ว

ความลาดเอียงของแผง ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องติดตั้งให้มีความลาดเอียงเพียงพอ เพื่อให้ทำให้ได้รับแสงแดดมากที่สุดและอีกประการหนึ่ง เพื่อให้เกิดการระบายน้ำฝนได้อย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการชำระล้างสิ่งสกปรกที่ติดค้างอยู่บนแผงเซลล์ด้วย การเลือกมุมความลาดเอียงและทิศทางของแผงที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานที่ว่า ตั้งอยู่เส้นรุ้งเท่าไร สำหรับประเทศไทยที่ดีที่สุด คือ  $15^\circ$  โดยมีทิศทางหันหน้าไปทางทิศใต้ แต่แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปติดไปติดบนหลังคาบ้านมุมเอียงของแผงโดยทั่วไป จะอยู่ช่วง  $15^\circ-45^\circ$  หรือขึ้นกับความลาดเอียงของหลังคาบ้านเป็นสำคัญ อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดก็คือ การปรับแผงให้เอียงตามการโคจรของดวงอาทิตย์ (Tracking) แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงติดตั้งแผงให้มีความลาดเอียงที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น

ปริมาณพลังแสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าจำนวนชั่วโมงที่พระอาทิตย์ส่องสว่างมายังพื้นโลกจะสามารถหาได้โดยใช้ข้อมูลของกรมกรมนิยามวิทยา แต่ข้อมูลนี้ไม่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับอัตราการตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งที่เป็นรังสีตรง และรังสีกระจาย (Global Irradiance) ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง โดยมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร ( $\text{kWh/m}^2$ ) ข้อสังเกตอัตราการตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ที่ถือว่าเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับเป็นตัวกำหนดกำลังงานสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$  หรือ  $1 \text{ kW/m}^2$  ในทางกลับกันเราอาจจะกล่าวถึงพลังงานที่ตกกระทบพื้นผิว ในแต่ละวันในรูปของจำนวนชั่วโมงการได้รับกำลังงานสูงสุดคงที่  $1 \text{ kW/m}^2$  ซึ่งเท่ากับ  $\text{kWh/m}^2/\text{Day}$

## 2.7 สมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

สมรรถนะของระบบ ปริมาณของพลังงานที่ผลิตได้ใน 1 วัน จากเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับสถานะอากาศและฤดูกาล เพื่อที่ตัดปัญหาความยุ่งยากต่างๆ ในการคำนวณหาสมรรถนะของระบบนั้นควรใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตในเวลา 1 ปี ซึ่งมีหน่วยเป็น kWh หน่วย หรือหน่วย (Unit) ซึ่งเหมือนกับการวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือนทั่วไป ผลผลิตที่ได้ในรอบปีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ดังนี้

1) ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรอบปี จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่มุมเอียงของแผงและทิศทางที่เอียงเบนจากทิศใต้

2) อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงาน เป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกำลังผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง 0.5% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C

3) ประสิทธิภาพของระบบ (Electrical Conversion Efficiency) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ต่อเชื่อม และเครื่องแปลงกระแส ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว

พลังงานที่ผลิตได้ใน 1 ปี (Annual Specific Yield) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และ วัดสมรรถนะของระบบ ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตได้ทั้งหมด (Total Electric Output) หารด้วยกำลังผลิตสูงสุดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Peak Power of Array) จากข้อมูลดังกล่าวเราสามารถนำไปคำนวณค่าต่างๆ ข้อมูลเฉลี่ยของประเทศ จากการรวบรวมข้อมูลโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แสดงว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ในรอบปี มีค่าประมาณ 1,200-1,400 kWh/kW/Year

ความยาวคลื่นแสงที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับแสงที่จะใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้นั้น ขอให้มีความยาวคลื่น ที่เหมาะสมกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ที่มาทำเซลล์ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นได้ นั่นก็หมายความว่า ไม่จำเป็นต้องเป็นแสงอาทิตย์อย่างเดียว แสงจากแหล่งต่างๆ ในชีวิตประจำวันก็สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามนอกจากช่วงพลังงานของแสงแล้ว ความเข้มของแสงจันทรืบนผิวโลกอ่อนมาก จึงนำมาใช้งานไม่ได้

## 2.8 การผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

โดยหลักแล้วจะเป็นการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนไฟกระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อป้อนให้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับหรือถ้าเป็นโหลดไฟฟ้ากระแสตรงก็มีตัวคอนเวอร์เตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและนอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เพื่อรักษาระบบให้มีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพในการจ่ายไฟฟ้านอกจากนี้ต้องมีระบบป้องกัน ไฟฟ้า เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร กระแสเกิน เป็นต้น

อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้นหากต้องการนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้ต่อไปจะต้องใช้



ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีกโดยรวมเข้าเป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้

#### 2.8.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีหน่วย W มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (Solar Array) เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการต่อกันเป็นอนุกรมจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและการต่อกันแบบขนานจะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า หากสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์แตกต่างกันก็จะมีผลให้ปริมาณของค่าเฉลี่ยพลังงานแสงสูงสุดในหนึ่งวันไม่เท่ากันด้วย รวมถึงอุณหภูมิก็มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า หากอุณหภูมิสูงขึ้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลง

#### 2.8.2 เครื่องควบคุมประจุ (Charge Controller)

เครื่องควบคุมประจุ ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้ปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมประจุคือเมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มแล้วจะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย)ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น

#### 2.8.3 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่ ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม

#### 2.8.4 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter)

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Sine Wave Inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่มีส่วนประกอบของมอเตอร์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็น Electronic Ballast

#### 2.8.5 ระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection)

ระบบป้องกันฟ้าผ่า ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่า หรือเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ความต่างศักย์สูง ในระบบทั่วไปมักไม่ใช้อุปกรณ์นี้ จะใช้สำหรับระบบขนาดใหญ่

ใหญ่และมีความสำคัญเท่านั้น รวมถึงต้องมีระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพด้วย เมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลของฟ้าผ่าถือว่ามีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษา ผลกระทบที่เกิดขึ้นและรวมทั้งหาวิธีป้องกันที่เหมาะสม

## 2.9 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.9.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

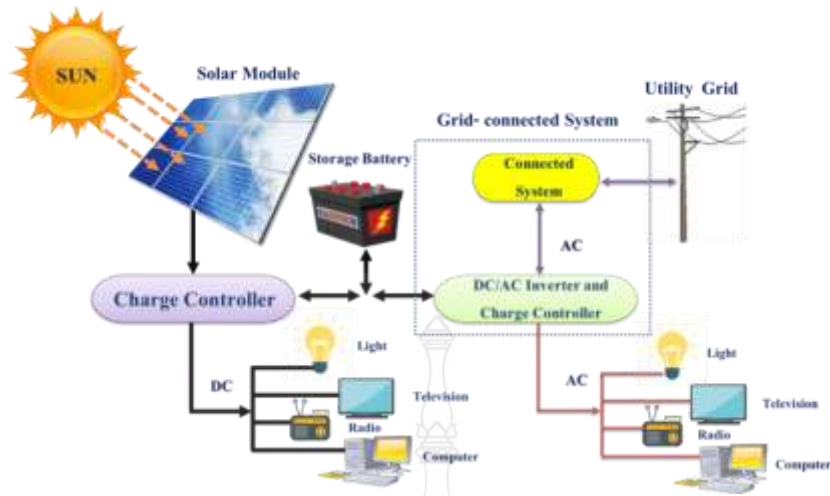
เป็นระบบผลิตไฟฟ้า ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญ ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ



รูปที่ 2.12 ระบบการผลิตแบบอิสระ

### 2.9.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

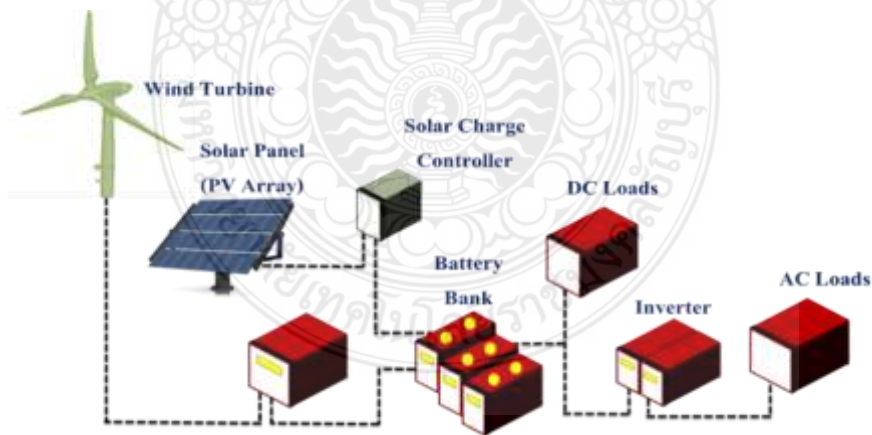
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบ สำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรงใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้า เข้าถึงอุปกรณ์ ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 ระบบการผลิตแบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

### 2.9.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ



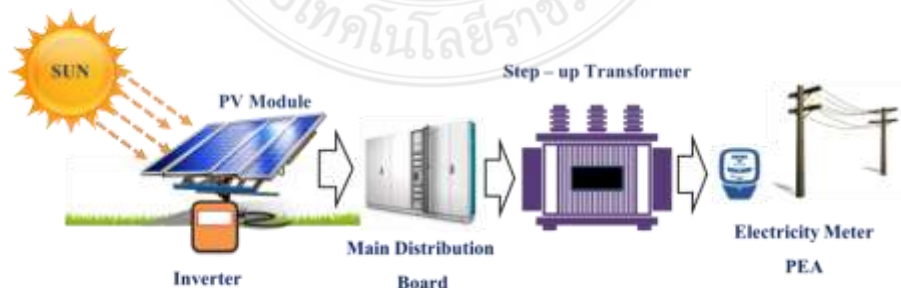
รูปที่ 2.14 ระบบการผลิตแบบผสมผสาน

## 2.10 รูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.10.1 โซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm)

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บนเส้นศูนย์สูตรของโลก ทำให้ได้รับความเข้มแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ย ตลอดทั้งปีสูง จึงมีความเหมาะสมอย่างมากในการพัฒนาโครงการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จากศักยภาพดังกล่าว ทางภาครัฐได้เล็งเห็นความเป็นไปได้ในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้า จึงมีการส่งเสริมให้ภาคเอกชนสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือ โซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) โดยอาศัยมาตรการสร้างแรงจูงใจผ่านการสนับสนุนในรูปแบบต่างๆ เช่น การยกเว้นภาษีให้กับการนำเข้าอุปกรณ์หลัก การสนับสนุนด้านการเงินในการพัฒนาโครงการ การกำหนดส่วนเพิ่มราคาซื้อขายไฟฟ้า (Adder) ในช่วงแรก 8 บาทต่อหน่วย เป็นระยะเวลา 10 ปีและมีการปรับลดลงเป็น 6.50 บาท ต่อหน่วยในเวลาต่อมา ปัจจุบันเปลี่ยนราคาซื้อขายไฟฟ้าเป็น Feed-in Tariff (FiT) และกำหนดกรอบระยะเวลาการรับซื้อไฟฟ้าที่ชัดเจน เป็นต้น

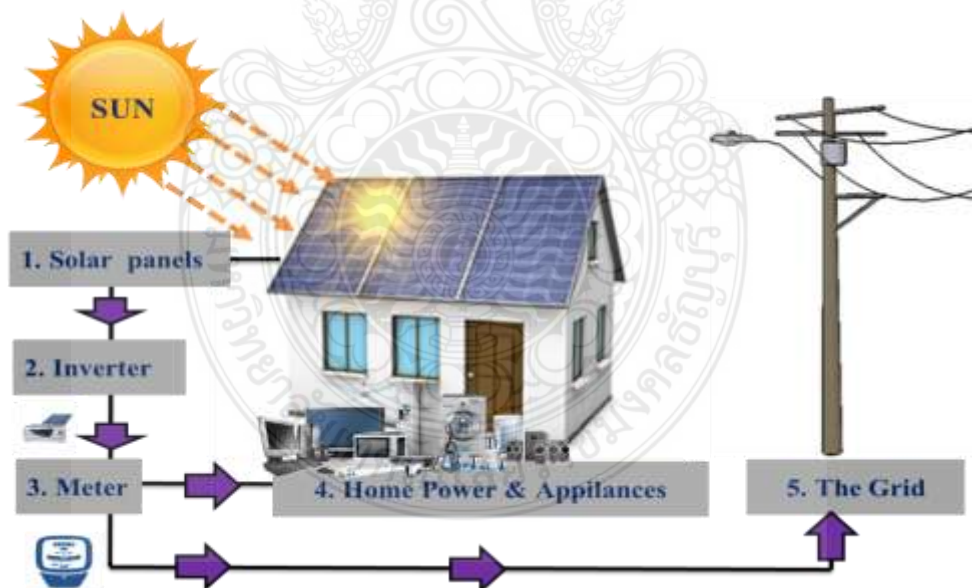
โครงการโซลาร์ฟาร์มประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ ที่สำคัญ คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หลังจากนั้นจะส่งผ่านไปยังเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จากนั้นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตขึ้นได้จะถูกส่งผ่านไปยังตู้จ่ายกระแสไฟฟ้าหลัก (Main Distribution Board) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติด้านไฟฟ้าแรงต่ำ หลังจากนั้นพลังงานทั้งหมดจะถูกส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (Step-Up Transformer) เพื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันต่ำให้เป็นแรงดันสูงขนาด 22,000 V และถูกควบคุมด้วยสวิตช์ตัดตอนแรงสูงอัตโนมัติและส่งผ่านไปยังระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยผ่านมิเตอร์จำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Electricity Meter) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดจำนวนของพลังงานไฟฟ้าที่ขายเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 2.15 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Solar Farm

## 2.10.2 โซลาร์รูฟท็อป (Solar Roof Top)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ “บนหลังคา” สำหรับผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย (Solar Roof Top) มีลักษณะการทำงานโดยการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์อยู่บนหลังคาบ้านหรือบางกรณีสามารถติดตั้งบนพื้นดินบนหลังคา โรงจอดรถ ฯลฯ ซึ่งในเวลากลางวัน แผงจะทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะไหลไป สู่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Grid-Connected Type Inverter) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในบ้านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz ไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้จะไหลไปสู่มิเตอร์ขายไฟฟ้า (Kilowatt Meter Selling Meter) ที่ติดตั้งอยู่ที่เสาไฟฟ้าหน้าบ้านอย่างอัตโนมัติ และในเวลา กลางคืน เมื่อไม่มีแสงอาทิตย์จะไม่มีการแปลงไฟฟ้าไหลออกจากแผงหรือถ้ามีก็น้อยมาก จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลออกมาจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในขณะเดียวกันก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อน จากเสาไฟฟ้าเข้ามาสู่แผงได้กระแสไฟฟ้าสลับของการไฟฟ้าจะหยุดค้าง อยู่ที่เครื่องแปลง กระแสไฟฟ้า ไม่สามารถไหลไปแผงได้ต่อมาในวันรุ่งขึ้นเมื่อมีแสงอาทิตย์เพียงพอ แผงก็จะเริ่มผลิต พลังงานไฟฟ้าอีกครั้งและระบบก็จะเริ่มทำงานเองโดยอัตโนมัติ ดังนั้นระบบฯ นี้ได้รับการออกแบบ โดยกำหนดให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ถูกใช้เองภายในบ้าน



รูปที่ 2.16 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภท Solar Rooftop



## 2.11 การใช้งานโปรแกรม PSCAD Version 4.6

โปรแกรม PSCAD เป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์ที่จดทะเบียนการค้าในนามของบริษัท Manitoba Hydro International Ltd. ประเทศแคนาดา เป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายจึงได้มีการวิจัยพัฒนาโปรแกรมมาอย่างต่อเนื่องกว่า 30 ปี เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้าที่มีความแม่นยำและใช้งานง่ายมีไลบรารีที่ครอบคลุมรูปแบบของระบบของอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานจนถึงฟังก์ชันการควบคุมใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนสูง [23]

สำหรับโปรแกรม PSCAD ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็น Version 4.6 ซึ่งได้มีการพัฒนาช่วยให้เกิดความสะดวกในการใช้งานโดยมีเครื่องมือให้เลือกใช้งานอย่างหลากหลายซึ่งปัจจุบันมีอุปกรณ์เครื่องมือให้เลือกใช้อย่างครบครัน ตัวอย่างเช่น โมเดลที่นำมาใช้สร้างแบบจำลองวิเคราะห์ผลได้แก่ แผงโซลาร์เซลล์ กังหันลม เป็นต้น การนำมาใช้งานเพียงแค่เลือกอุปกรณ์มาประกอบในแบบจำลองที่ต้องการศึกษาและใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องให้ถูกต้องและครบถ้วนเพื่อให้ผลการคำนวณออกมามีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้งานเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

### 2.11.1 เมนูการใช้งานและการเลือกใช้คำสั่งโปรแกรม PSCAD

การสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการทดลองผลของการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้เมนูต่างๆ ในโปรแกรม PSCAD Version 4.6 ดังนี้

#### 2.11.1.1 โครงการ (Project)

แถบเมนู โครงการ มีส่วนสำคัญสำหรับการปรับตั้งค่าต่างๆ ในการประมวลผลของโปรแกรมโดยสามารถกำหนดตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลได้ที่ตัวเลือก “General Settings” แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แถบเมนู โครงการ



### 2.11.1.2 มุมมอง (View)

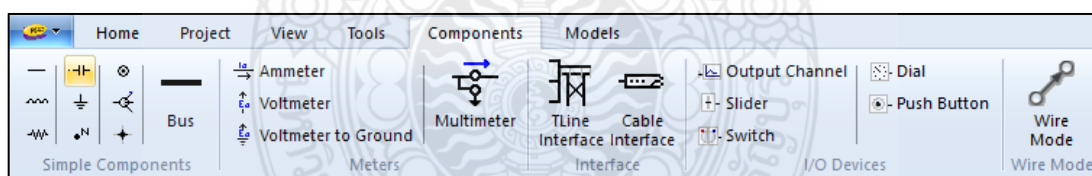
แถบเมนู มุมมอง ประกอบด้วยช่องทำเครื่องหมายของตัวเลือกต่างๆ สำหรับให้แสดงภาพองค์ประกอบส่วนต่างๆ บนหน้าต่างของงาน ตัวอย่างเช่น การทำเครื่องหมายลูกที่ “Grids” บนหน้าต่างของงานจะแสดง Grids เป็นจุดที่พื้นหลังของงาน



รูปที่ 2.18 แถบเมนู View

### 2.11.1.3 ส่วนประกอบ (Components)

แถบเมนู ส่วนประกอบ จะมีสัญลักษณ์ของส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่อยู่ในวงจรไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ สายไฟฟ้า จุดต่อกราวด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือสำหรับใช้สร้างช่องสัญญาณ การควบคุม การแสดงผลด้วยกราฟ อยู่ในเมนูเมนูนี้อีกด้วย



รูปที่ 2.19 แถบเมนู Components

### 2.11.1.4 โมเดล (Models)

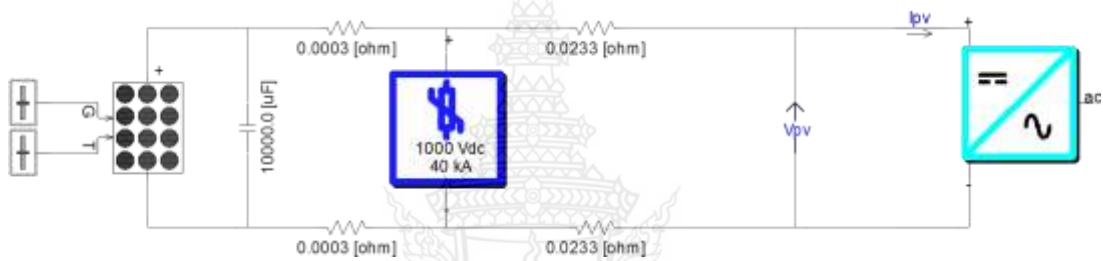
แถบเมนู โมเดล เป็นเมนูที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้างวงจรระบบไฟฟ้าซึ่งสามารถเลือกโมเดลสำเร็จมาใช้งานได้ง่ายและสะดวก โดยมีการจัดแยกหมวดหมู่การใช้งาน เป็น 18 หมวด ในแต่ละหมวดมีการจำแนกประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกนำมาใช้งานอีกด้วย



**รูปที่ 2.20** แถบเมนู Model

2.11.1.5 การวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและแสดงผลด้วยกราฟ

การวัดผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า ดำเนินการได้โดย ไปที่เมนู Components และทำการเลือกสัญลักษณ์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการวัดค่ามาใส่ในวงจรไฟฟ้าบริเวณจุดที่ต้องการวัดผล เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{pv}$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_{pv}$ ) ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.21



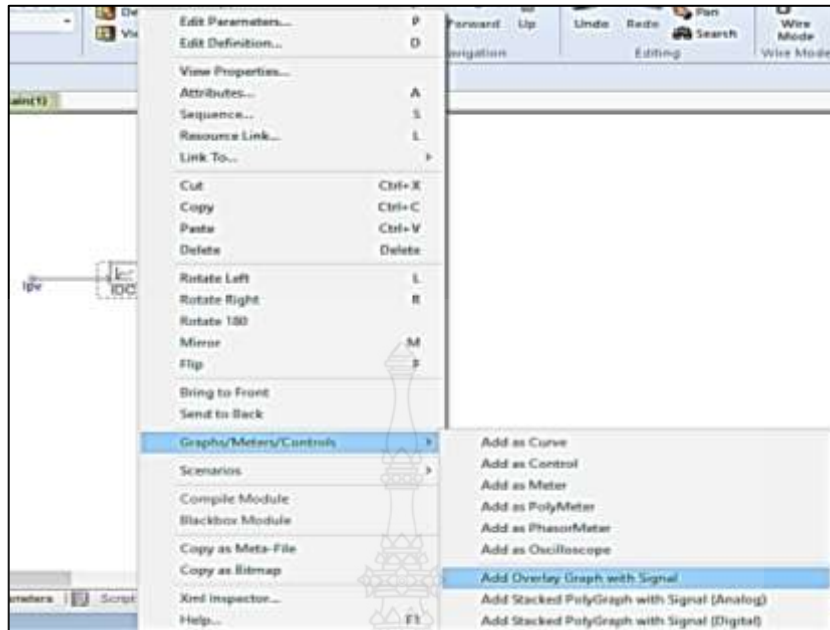
**รูปที่ 2.21** การวัดผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

จากนั้นให้เลือกที่สัญลักษณ์ “Output Channel” ซึ่งอยู่ในเมนู Components และดำเนินการสร้างช่องสัญญาณเพื่อให้เชื่อมโยงกับของพารามิเตอร์ในที่ต้องการวัดค่า ดังนี้

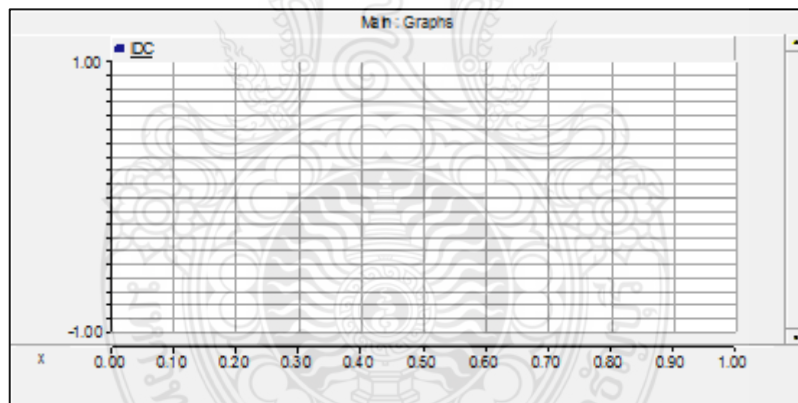


**รูปที่ 2.22** การสร้างช่องสัญญาณแสดงผล

การเรียกหน้าต่างของการแสดงผลด้วยกราฟนั้น ให้ดำเนินการคลิกขวาที่สัญลักษณ์ภาพกราฟในรูปที่ 2.22 จากนั้นเลือกที่เมนู “Graphs/Meters/Controls” และไปที่เมนู “Add Overlay Graph with Signal” ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24



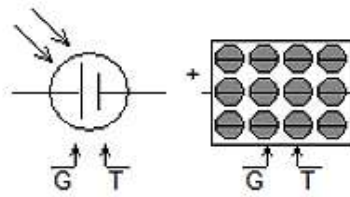
รูปที่ 2.23 การเรียกหน้าต่างแสดงผลด้วยกราฟ



รูปที่ 2.24 หน้าต่างของกราฟแสดงผล

### 2.11.2 การสร้างรูปแบบของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์

โปรแกรม PSCAD Version 4.6 ได้มีการพัฒนาโดยการเพิ่มรูปแบบของโมเดลแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Source)

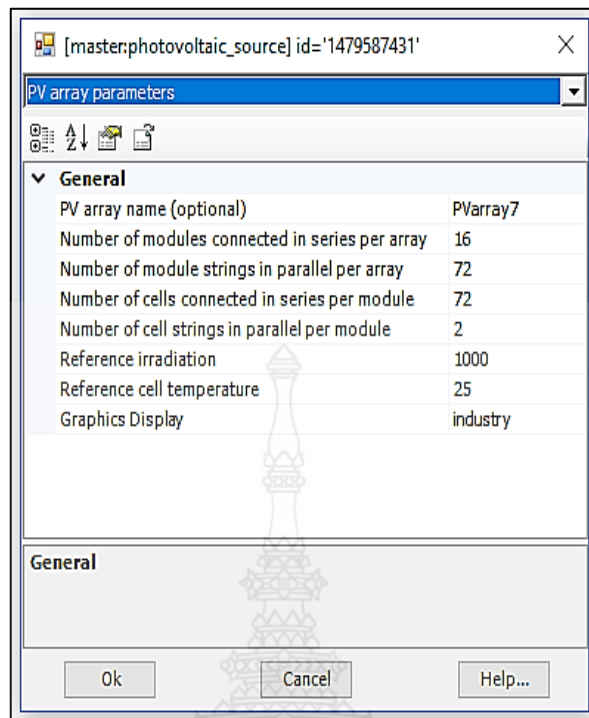


รูปที่ 2.25 โมเดลของโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม PSCAD

การสร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษากรณีการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

โดยที่

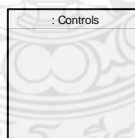
PV array name (optional)	=	ชื่อของ PV อะเรย์
Number of modules connected in series	=	จำนวน โมดูลต่ออนุกรมต่ออะเรย์ โดยกำหนดค่า เท่ากับ 16
Number of modules strings in parallel	=	จำนวน โมดูลต่อขนานต่ออะเรย์ โดยกำหนดค่า เท่ากับ 72
Number of cells connected in series	=	จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมต่อ โมดูล โดยกำหนดค่า เท่ากับ 72
Number of cell strings in parallel	=	จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานต่อ โมดูล โดยกำหนดค่า เท่ากับ 2
Reference irradiation	=	อ้างอิงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยกำหนดค่า เท่ากับ 1,000 W/m <sup>2</sup>
Reference cell temperature	=	อ้างอิงค่าอุณหภูมิ 25° C
Graphics Display	=	การแสดงผลกราฟฟิก เลือก “industry”



รูปที่ 2.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.11.3 การสร้างแผงควบคุมและการอินเตอร์เฟซข้อมูล

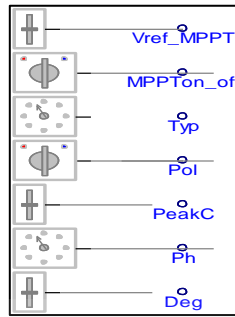
การสร้างแผงควบคุม (Control Panel) ดำเนินการ โดยไปที่แท็บ Components เลือก สัญลักษณ์ “Control Panel” นำไปวางในพื้นที่ว่างของ โปรแกรมและปรับขนาดตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผงควบคุม (Control Panel)

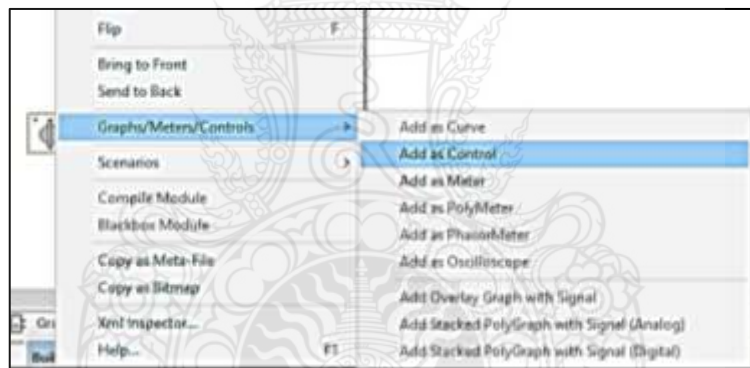
จากนั้นสร้างประเภทของปุ่มคอนโทรล และสร้างช่องสัญญาณควบคุม (Signal) เชื่อมต่อกับส่วนที่ต้องการให้ปรับการควบคุมได้ แสดงในรูปที่ 2.28



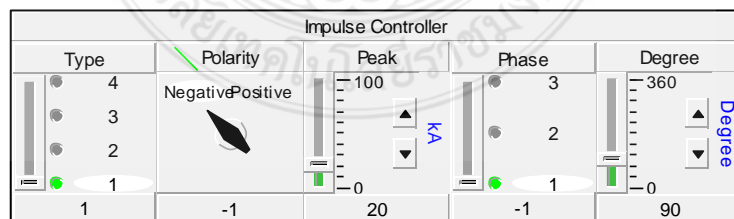


รูปที่ 2.28 การสร้างช่องสัญญาณ (Signal)

สำหรับการอินเตอร์เฟซข้อมูล ให้ดำเนินการคลิกขวาที่รูปปุ่มคอนโทรลในรูปที่ 2.29 จากนั้นเลือกที่เมนู “Graphs/Meters/Controls” และไปที่เมนู “Add Control” และนำไปวางในหน้าต่าง Control Panel ที่ได้สร้างขึ้นมา



รูปที่ 2.29 การอินเตอร์เฟซข้อมูล



รูปที่ 2.30 การสร้างแผงปุ่มคอนโทรล

#### 2.11.4 การตั้งค่าประมวลผลโปรแกรม PSCAD



ก่อนที่จะให้โปรแกรม PSCAD ทำการคำนวณและจำลองเหตุการณ์ตามวงจรสมมูลที่ได้กำหนดไว้ นั้นต้องกำหนดค่าเวลาการคำนวณก่อนเสมอเพื่อให้ผลตอบวนองด้านการคำนวณและการพล็อตกราฟมีความละเอียดสูง สามารถเข้าไปปรับตั้งค่าได้ที่เมนู “Project” และเลือกที่เมนู “General Setting” จากนั้นไปที่แท็บ โดยมี 3 ค่า ที่ต้องป้อน คือ Duration of run, Solution time step และ Channel plot step

โดยที่

- |                         |   |   |
|-------------------------|---|---|
| Duration of run (sec)   | = | ช่วงเวลาที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณหน่วยเป็น s    |
| Solution time step (μs) | = | ช่วงเวลาของการบันทึกผลเก็บข้อมูล หน่วยเป็น μs |
| Channel plot step (μs)  | = | ช่วงเวลาของการพล็อตกราฟ หน่วยเป็น μs          |



รูปที่ 2.31 การปรับตั้งค่าเวลาโปรแกรม PSCAD

สำหรับการรันค่าโปรแกรม ให้เลือกที่สัญลักษณ์  ในเมนูเมนู Home โปรแกรม จะดำเนินการรันค่าจนกระทั่งครบเสร็จสิ้นสมบูรณ์ตามเวลาที่ได้ทำการปรับตั้งค่าเอาไว้ ในกรณีถ้าหากต้องการหยุดรันค่าโปรแกรมให้เลือกที่สัญลักษณ์  ซึ่งโปรแกรมจะหยุดรันค่าทันที

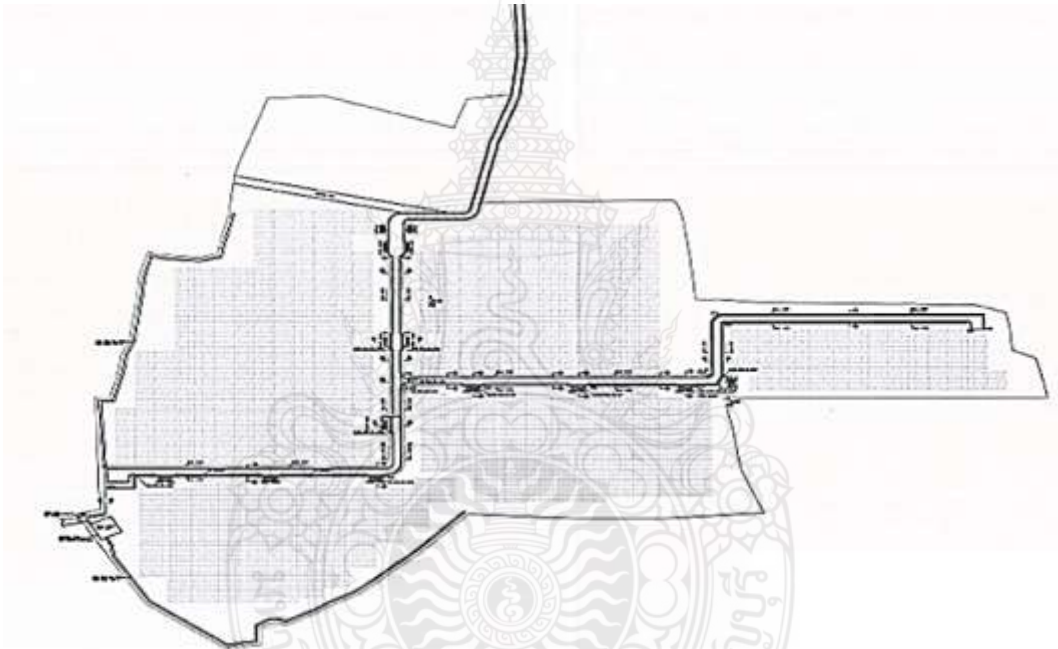
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

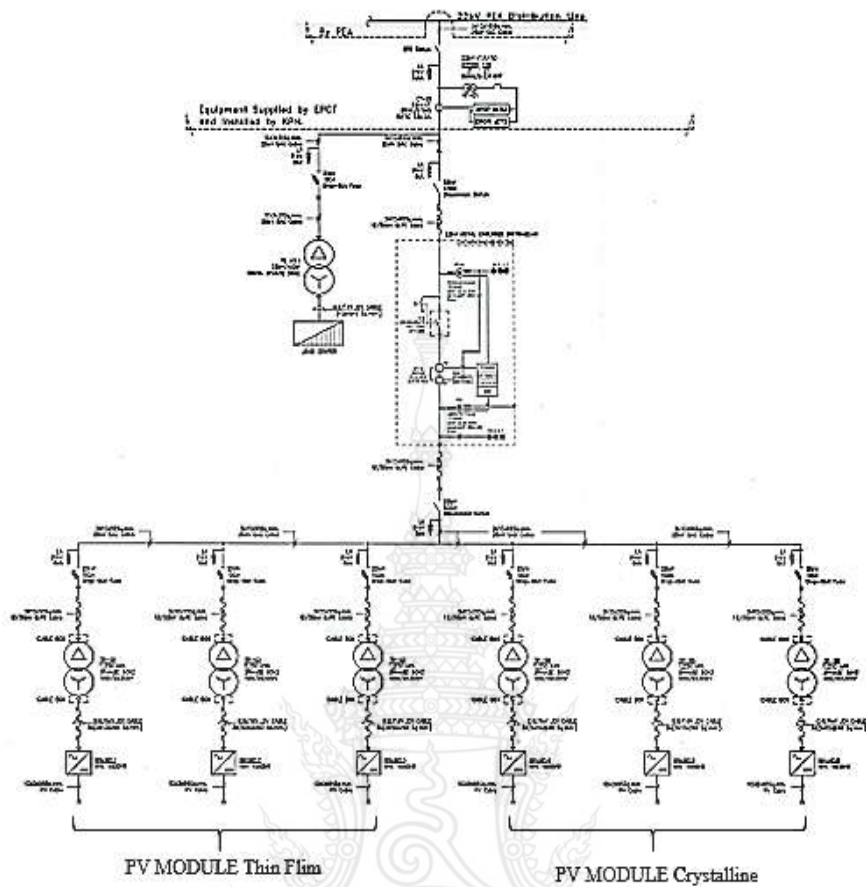
การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW โดยได้ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรีมาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม PSCAD Version 4.6 ประกอบด้วย อิมพัลส์ฟ้าผ่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Tin Film อินเวอร์เตอร์ และ กับังคักฟ้าผ่า ซึ่งได้จำลองเหตุการณ์ จากกรณีการเกิดฟ้าผ่าและทำการวิเคราะห์ผลจากค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในด้าน DC ที่ตำแหน่งสายไฟฟ้าก่อนเข้า อินเวอร์เตอร์ และในด้าน AC ที่ตำแหน่งสายไฟฟ้าที่เฟส B ก่อนเข้าหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA โดยพิจารณาในกรณีที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Strike) ที่รูปคลื่นฟ้าผ่าลำแรกขนาด 10/350  $\mu$ s และ รูปคลื่นฟ้าผ่าลำต่อมา ขนาด 0.25/100  $\mu$ s รวมทั้งในกรณีที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike) ที่รูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 8/20  $\mu$ s [24] โดยกำหนดค่ากระแสฟ้าผ่า ที่ 3 ระดับ คือ 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งจากสถิติค่ากระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20 kA มีลักษณะเป็นฟ้าผ่าชั่วพล ในสถานะที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า เพื่อนำผลที่เกิดขึ้นมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลและสรุปงานวิจัยต่อไป สำหรับขั้นตอนในการดำเนินวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

- 3.1 ศึกษา ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน
- 3.2 ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 3.3 การสร้างแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฟ้าผ่า
- 3.4 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตามกรอบแนวคิด

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้กรณีศึกษาจากบริษัทผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรีมาใช้เป็นข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย โดยมีลักษณะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน (PV Farm) อัตรากำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวม 6 MW มีองค์ประกอบชนิดของแผงโซลาร์เซลล์แบบผสม 2 ชนิด ได้แก่ PV Module Thin Film จำนวน 24,192 แผง และ PV Module Poly Crystalline จำนวน 9,900 แผง มีอินเวอร์เตอร์ขนาด 1,000 kW จำนวน 6 ตัว มุมติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์  $17^\circ$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ขอบเขตพื้นที่การติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และ รูปที่ 3.2 แสดงแบบผังทางไฟฟ้า (Single line Diagram) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



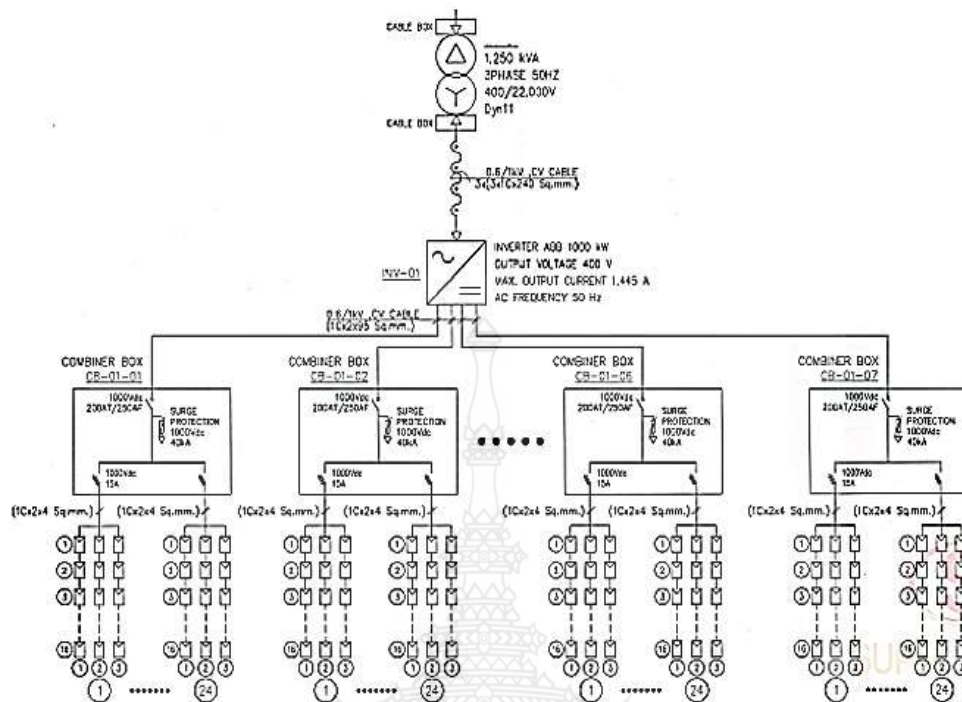
รูปที่ 3.1 ขอบเขตพื้นที่ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน [25]



รูปที่ 3.2 แบบผังทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน [25]

สำหรับขอบเขตการทำวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกจำลองกรณีการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของแผงโซลาร์เซลล์ในกลุ่มของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ซึ่งเป็นแผงโซลาร์เซลล์ ชนิด Thin Film มีอัตราการผลิตค่าพลังงานไฟฟ้าขนาด 125 W จำนวนติดตั้งแผงทั้งสิ้น 8,064 แผง การจัดเรียงของแผงจำนวน 16 Module /String อัตรากำลังผลิต 2,000 W/String ดังแสดงในรูปที่ 3.3





รูปที่ 3.3 แบบผังทางไฟฟ้าของกลุ่มแผงโซลาร์เซลล์ชนิด Thin Film [25]

### 3.1 ศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

#### 3.1.1 แผงโซลาร์เซลล์ (PV Array)

แผงโซลาร์เซลล์โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ (Monocrystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน Crystalline Silicon (C-Si) ผลิตจากแท่งผลึกซิลิคอน ที่เกิดจากการหลอมละลายซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 °C ผ่านกระบวนการตกผลึกอย่างช้าๆ และนำมาตัดเป็นแผ่นบางๆ เรียกว่า เวเฟอร์ โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานประมาณร้อยละ 13-15 โดยที่ต้นทุนในการผลิตแผงเซลล์ชนิดนี้ค่อนข้างสูง

2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน Amorphous Silicon (A-Si) เป็นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่ง โดยใช้สารซิลิคอน สารโบรอน และสารฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปก๊าซทั้งหมด นำมาเคลือบเป็น

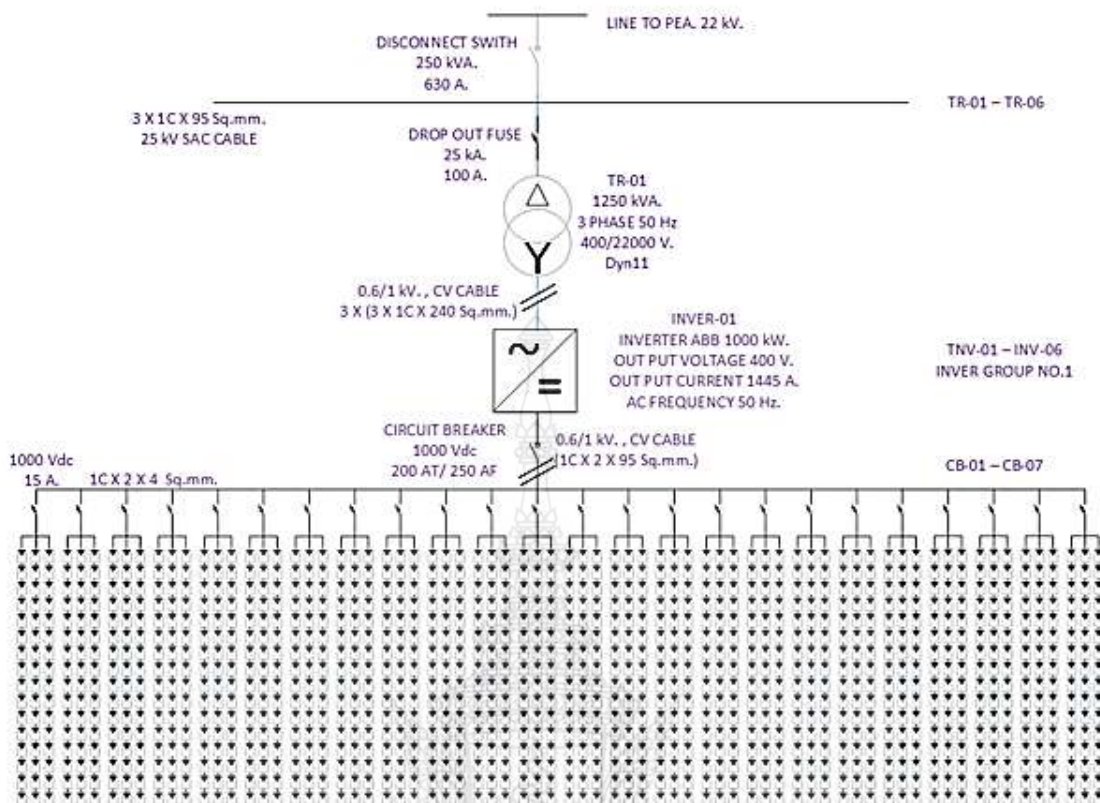
ฟิล์มบาง (Thin film) ลงบนแผ่นแก้ว แผ่นพลาสติกหรือแผ่นโลหะ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำกว่าชนิดผลึกซิลิคอน แต่ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการผลิต ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลง และเพิ่มประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงประมาณร้อยละ 6-8

3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดของสารประกอบคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Di-Selenide) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สารผสมของ Copper Indium Gallium และ Selenium โดยมีทั้งที่ใช้ Cadmium Sulphide และไม่ใช่ Cadmium Sulphide เป็นบัพเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับชนิดผลึกซิลิคอน อยู่ที่ประมาณร้อยละ 9-13 [26]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนหรือชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell) ซึ่งมีการจัดเรียงของแผงโซลาร์เซลล์และคุณลักษณะทางระบบไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

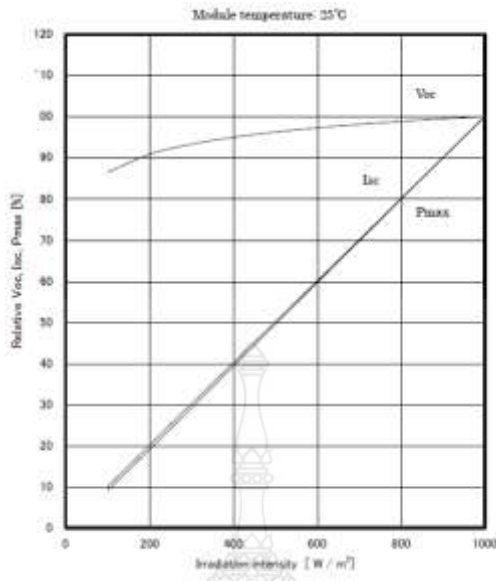
- 1) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ของ PV Module มีค่าเท่ากับ 125 Wp
- 2) จำนวนของ PV Module เท่ากับ 8,064 แผง
- 3) PV Module ต่อ String เท่ากับ 16 Module/String
- 4) กำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ เท่ากับ 2,000 W/String
- 5) ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) มีค่าเท่ากับ 728 V
- 6) ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ ) มีค่าเท่ากับ 2.75 A
- 7) ค่าแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) มีค่าเท่ากับ 955.2 V
- 8) ค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) มีค่าเท่ากับ 3.37 A

จากนั้นนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองของแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม PSCAD โดยในแต่ละ Section ของ PV Model จะประกอบด้วยแผง PV จำนวน 16 Module 72 String รวม 1,152 แผง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

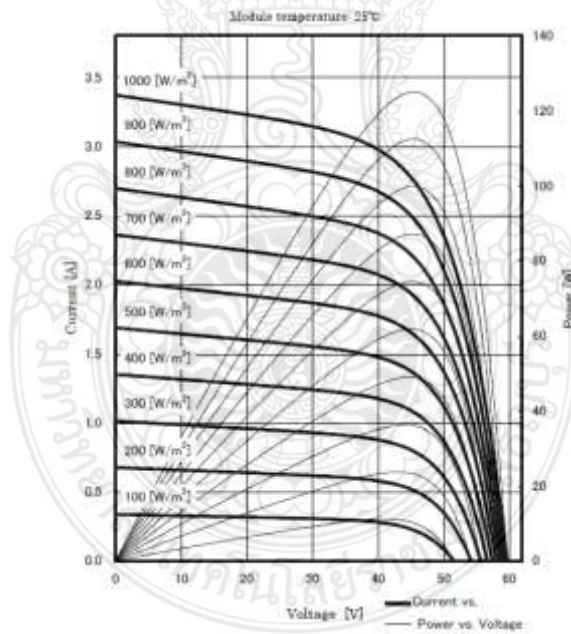


รูปที่ 3.4 จำนวนของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละส่วน (Section)

ด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ได้รับการทดสอบของค่าของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short-circuit current) ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open-circuit voltage) และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่ามาตรฐานของความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  ได้ผลดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.5 และค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 3.6

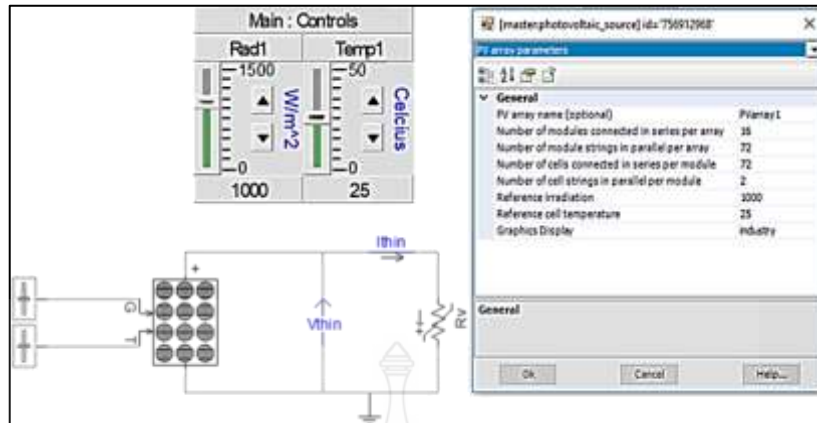


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร กำลังไฟฟ้าสูงสุด [27]



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า [27]

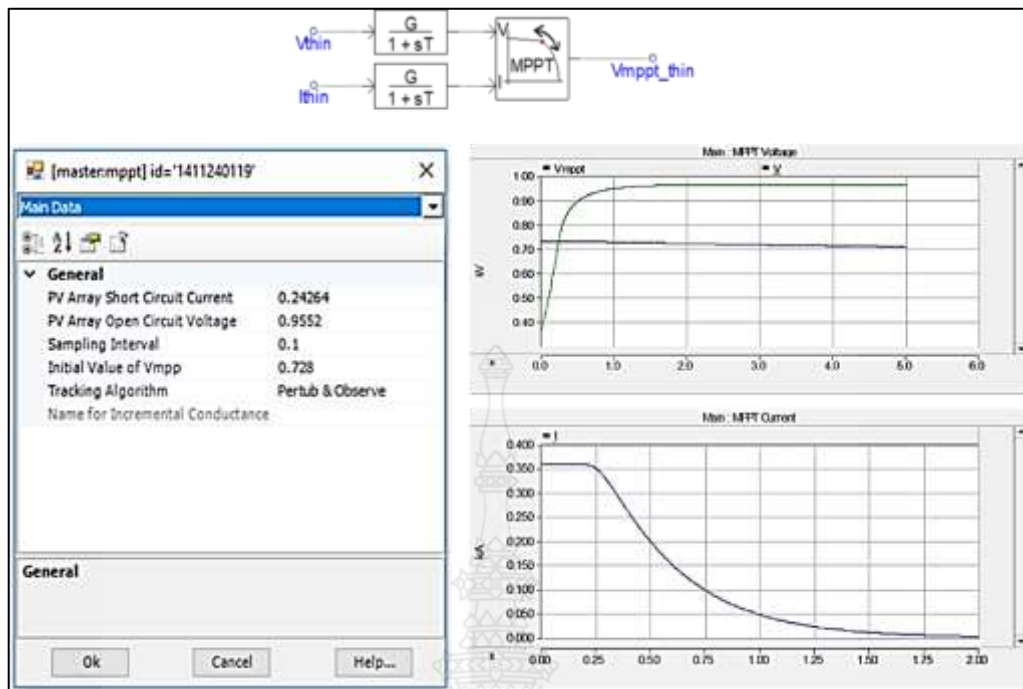
จากนั้นนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองของแผงโซลาร์เซลล์ ดังแสดงตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม PSCAD

Maximum Power Point Tracking (MPPT) หมายถึง ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ถูกรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด (Maximum Power) ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar radiation) อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient temperature) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell temperature) ระบบ MPPT ได้รับการออกแบบมาให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ได้ค่ากำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ในรูปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีของ MPPT ที่จะทำได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น หากตรวจสอบพบว่า กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่า จะย้ายจุดควบคุมไปยังแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในการสร้างแบบจำลองของ MPPT ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Abdularahman Kalbat (2013) ซึ่งได้ทำสร้างแบบจำลอง Grid-Tied PV และ คลื่นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์ [28] จึงได้สร้างแบบจำลองของวงจร MPPT ดังแสดงในรูปที่ 3.8





รูปที่ 3.8 แบบจำลองของวงจร MPPT ในโปรแกรม PSCAD [29]

จากรูปที่ 3.8 ค่า PV Array Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ) คำนวณได้มาจาก

$$\begin{aligned}
 V_{oc} &= 955.2 \text{ V} \\
 &= 955.2/1,000 \text{ V} \\
 &= 0.9952 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

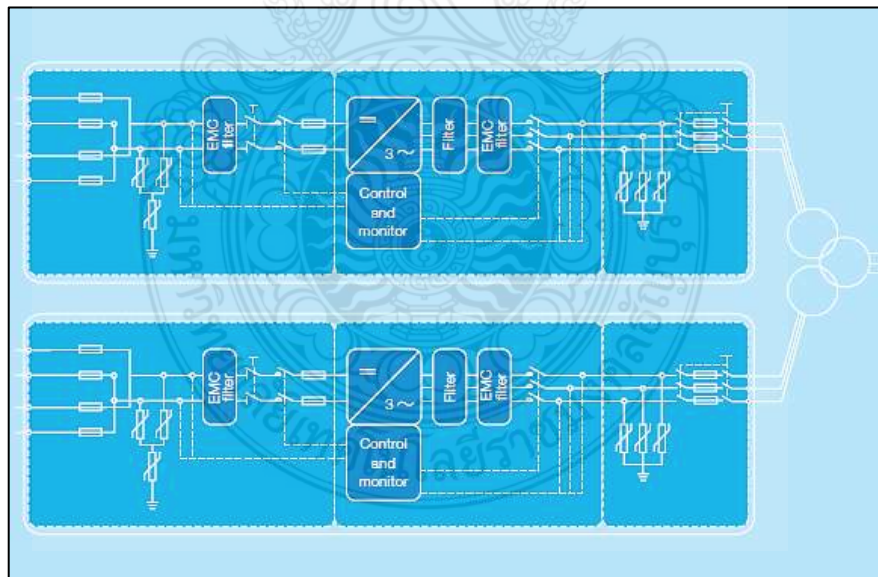
ค่า PV Array Short Circuit Current ( $I_{sc}$ ) คำนวณได้มาจาก

$$\begin{aligned}
 I_{sc} &= 3.37 \text{ A /PV String} \\
 &= (3.37/1,000 \text{ A}) \times 72 \text{ PV String} \\
 &= 0.24264 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

## 3.2 ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

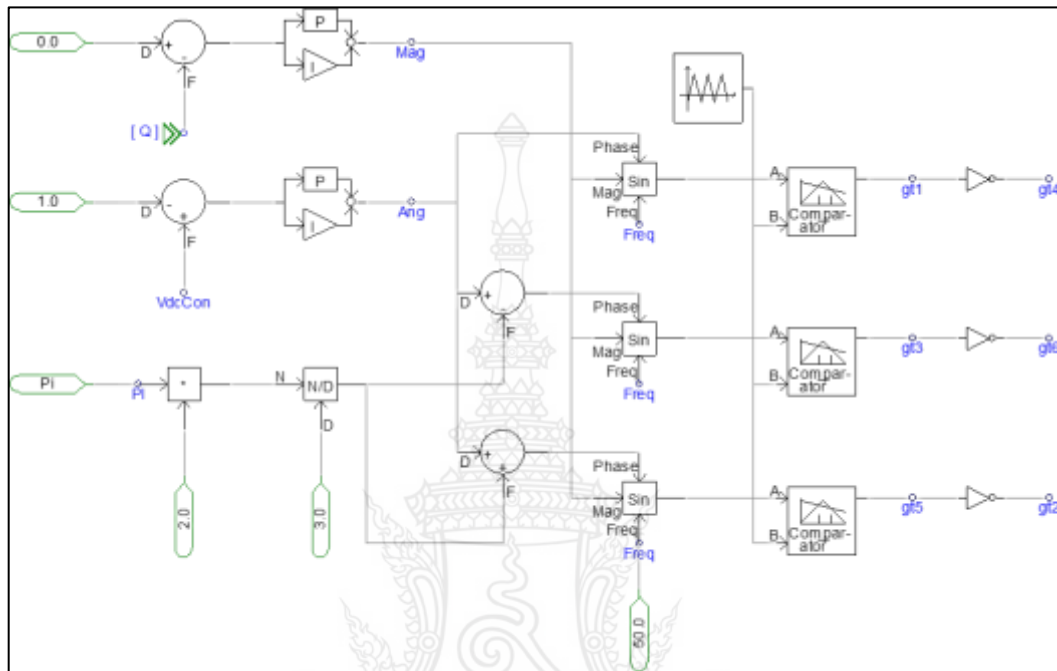
### 3.2.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการที่ใช้ในกรณีศึกษา เป็นอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ (Central Inverter) ผลิตภัณฑ์ของ ABB รุ่น PVS800-57-1000KW-C ขนาด 3 เฟส 400 V ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีผลการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หลักการทำงานของอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ในการแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ 3 Phase Induction Motor ดังแสดงในรูปที่ 3.9

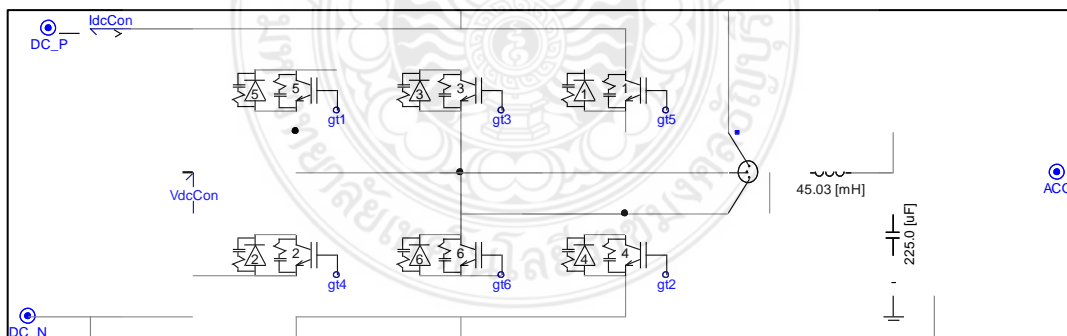


รูปที่ 3.9 โครงข่ายการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบศูนย์รวม [30]

การสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส ในโปรแกรม PSCAD นั้นได้ศึกษาในงานวิจัยของ Abdulrahman Kalbat (2013) ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบวงจรถัดไป ประกอบด้วย 6 IGBT ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบวงจรถัดไป



รูปที่ 3.11 การต่ออินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบวงจรถัดไปในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

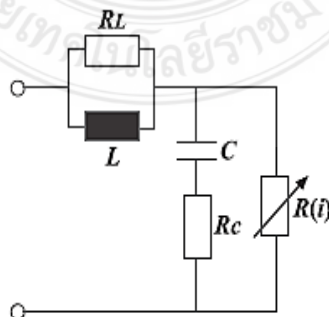
### 3.2.3 กัับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester)

กัับดักฟ้าผ่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าปานกลาง (Medium Voltage) หรือ 1,000 V ขึ้นไป เพื่อทำหน้าที่ในการป้องกันแรงดันเกินขึ้นในระบบซึ่งอาจมีต้นเหตุจากการเกิดฟ้าผ่า การทำงานโดยทั่วไปของอุปกรณ์กัับดักฟ้าผ่าในขณะที่แรงดันปกติ ตัวกัับดักฟ้าผ่าจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมากและมีกระแสรั่วไหลน้อยมาก แต่เมื่อเกิดแรงดันเกินอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำทำให้กระแสที่เกิดจากฟ้าผ่าไหลลงดินได้อย่างสะดวกซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ต่ออยู่หลังกัับดักฟ้าผ่าไม่ได้รับอันตรายหรือป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย กัับดักฟ้าผ่าที่มีใช้อยู่อาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1) Spark Gap Arrester กัับดักฟ้าผ่าชนิดนี้จะประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Varistor) ต่อกันกับ Spark Gap โดยปกติแล้ว Varistor มักทำมาจากสารซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยจะเรียกกัับดักฟ้าชนิดนี้ว่า SiC-Arrester

2) Arrester Without Spark Gap กัับดักฟ้าผ่าชนิดนี้ประกอบด้วยชั้นของตัวต้านทานโลหะออกไซด์ที่มีลักษณะขึ้นกับแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก วัสดุโลหะออกไซด์ที่ใช้โดยทั่วไปคือออกไซด์ของสังกะสี (Zinc) กัับดักฟ้าชนิดนี้เรียกว่า MO-Arrester หรือ ZnO Arrester ในปัจจุบันกัับดักฟ้าชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างมาก

การเลือกใช้งานอุปกรณ์กัับดักฟ้าโดยทั่วไปจะคำนึงถึง 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ระดับแรงดันและการต่อลงดิน และพิกัดของกระแส Discharge สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์กัับดักฟ้าที่ป้องกันในด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ค่าระดับแรงดัน 1,000 V พิกัดของกระแส 40 kA และในด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ค่าแรงดัน 400/230 V พิกัดของกระแส 40 kA ซึ่งการออกแบบวงจรอุปกรณ์กัับดักฟ้าที่ศึกษาในงานวิจัยของ Valdemir S. Brito (2018) ที่ได้ศึกษารูปแบบของช่วงกว้างของความถี่และแอมพลิจูดสำหรับโลหะออกไซด์กัับดักฟ้าผ่า โดยวงจรทางไฟฟ้าของกัับดักฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรทางไฟฟ้าของกัับดักฟ้า [31]

จากวงจรไฟฟ้าของกับดักฟ้าผ่าในรูปที่ 3.12 สามารถคำนวณหาค่า  $L$ ,  $R_L$ ,  $C$ ,  $R_C$  ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L = \frac{h}{n} \quad (\mu s) \quad (3.1)$$

$$R_L = \frac{8 \times L}{\Delta t} \quad (\Omega) \quad (3.2)$$

$$C = 12.31 pF \times \left(\frac{n}{h}\right) \quad (3.3)$$

$$R_C = \frac{0.15 \times \Delta t}{2C} \quad (\Omega) \quad (3.4)$$

โดยที่

$h$  = ความสูงของอุปกรณ์กับดักฟ้า

$n$  = จำนวนหลักที่ต่อขนานของอุปกรณ์กับดักฟ้า

$R$  = ความต้านทาน

$L$  = ความเหนี่ยวนำ

$C$  = ตัวเก็บประจุ

$\Delta t$  = เวลาที่ใช้ในการประมวลผลโปรแกรม

การคำนวณและสร้างแบบจำลองกับดักฟ้าผ่าสำหรับป้องกันอุปกรณ์ด้าน DC กับดักฟ้าที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองได้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของ ABB โดยมีข้อมูลดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) แบบ 1 เฟส ผลิตภัณฑ์ ABB [32]

ข้อมูล	รายละเอียด
Extended Product Type	OVR PV T2 40-1000 P QS
Product Net Width	53.4 mm
Product Net Depth	64.8 mm
Product Net Height	45 mm
Product Net Weight	0.36 kg
Number of Protected Poles	2
Arrester Class	2
Standards	IEC 61 643-11/ EN 50539-11
Discharge Current	Nominal 20 kA, Maximum 40 kA
Impulse Current	I (imp, 10 /350 $\mu$ s) 2 kA I (total, 10 /350 $\mu$ s) 4 kA

จากสมการที่ (3.1) คำนวณหาค่า  $L$  ได้ค่าดังนี้

$$L = h / n \text{ (}\mu\text{H)} = 45 \times 10^{-3} / 1 = 0.045 \mu\text{H}$$

จากสมการที่ (3.2) คำนวณหาค่า  $R_L$  ได้ค่าดังนี้

$$R_L = \frac{8 \times L}{\Delta t} \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{8 \times 0.045 \times 10^{-6}}{0.5 \times 10^{-6}} = 0.72 \Omega$$

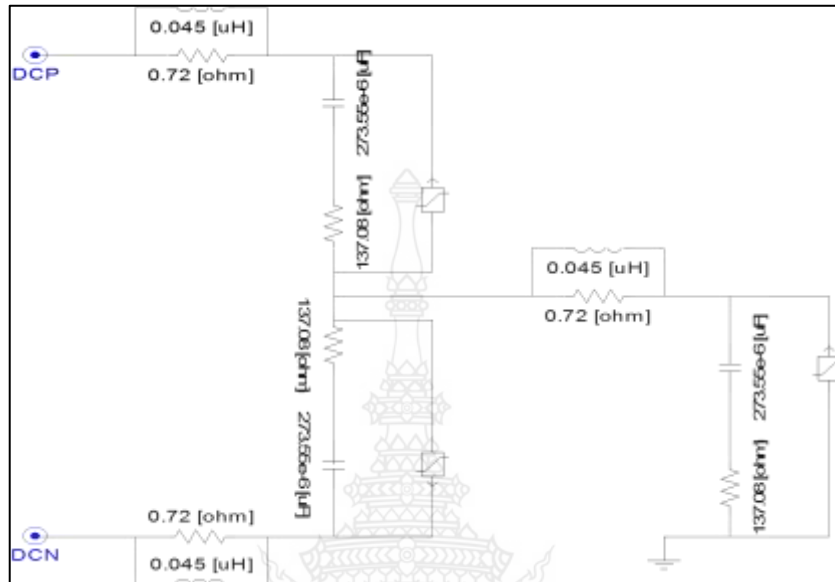
จากสมการที่ (3.3) คำนวณหาค่า  $C$  ได้ค่าดังนี้

$$C = 12.31 \text{ pF} \times (n / h) = 12.31 \text{ pF} \times (1 / 0.045) = 273.55 \text{ pF}$$

จากสมการที่ (3.4) คำนวณหาค่า  $R_C$  ได้ค่าดังนี้

$$R_C = \frac{0.15 \times \Delta t}{2C} \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{0.15 \times 0.5 \times 10^{-6}}{2 \times 273.55 \times 10^{-12}} = 137.08 \Omega$$

จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้มาใส่ในวงจรไฟฟ้าของแบบจำลองของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ชนิด 1 เฟส สำหรับติดตั้งในระบบไฟฟ้าด้าน DC ของโปรแกรม PSCAD Version 4.6



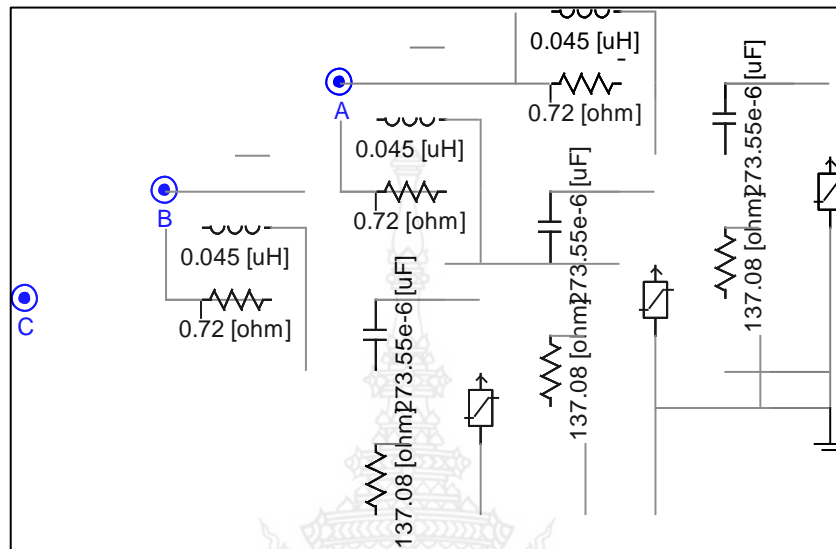
รูปที่ 3.13 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าชนิด 1 เฟส

การคำนวณและสร้างแบบจำลองกับคักฟ้าสำหรับป้องกันอุปกรณ์ด้าน AC กับคักฟ้าที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองได้เลือกใช้ ผลิตภัณฑ์ของ ABB โดยมีข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) แบบ 3 เฟส ผลิตภัณฑ์ ABB [32]

ข้อมูล	รายละเอียด
Extended Product Type	OVR T2 3N 40 -440s P TS QS
Product Net Width	95.8 mm
Product Net Depth	76.7 mm
Product Net Height	45 mm
Number of Protected Poles	3
Standards	IEC 61 643-11/ EN 61643-11
Discharge Current	Nominal 20 kA, Maximum 40 kA
Impulse Current	I (total, 8 /20 μs) 40 kA

เนื่องจากค่า  $L$ ,  $RL$ ,  $C$  และ  $RC$  มีลักษณะการคำนวณเช่นเดียวกับอุปกรณ์กับฟ้าผ่าด้าน DC จึงนำค่าต่างๆ มาใส่ในวงจรแบบจำลองของกับดักฟ้าผ่าด้าน AC ในโปรแกรม PSCAD



รูปที่ 3.14 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าชนิด 3 เฟส

### 3.3 การสร้างแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฟ้าผ่า

การพิจารณาสร้างแบบจำลองอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าได้ทำการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งในการวิจัยนี้ได้แยกอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าตรง (Direct Lightning Strike) และกรณีที่เกิดจากฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike) โดยมีการสร้างอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าจำลองจากโปรแกรม PSCAD ดังนี้

#### 3.3.1 กรณีฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Strike)

ได้ใช้สมการหาค่ากระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลาตามมาตรฐานของ IEC62305-1 [33] ดังสมการนี้

$$I(t) = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)} \times e^{(-t/T_2)} \quad (3.4)$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่านขนาด 0.25/100  $\mu s$  เลือกใช้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$k = 0.993$$

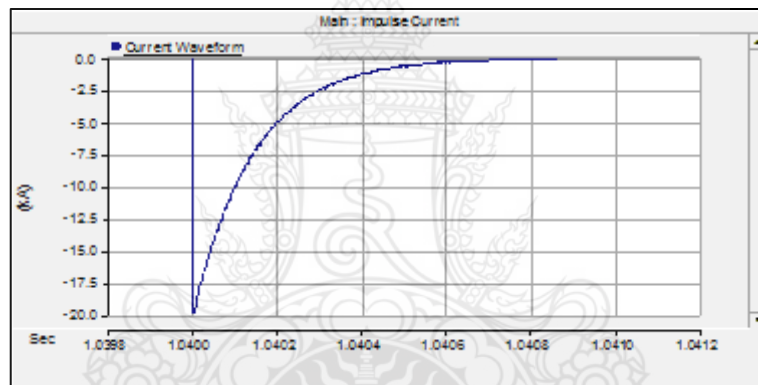
$$T_1 = 0.45 \mu s$$

$$T_2 = 143 \mu s$$

แทนค่าในสมการที่ (3.4)

$$I(t) = \frac{I}{0.993} \times \frac{(t/0.45\mu s)^{10}}{1+(t/0.45\mu s)} \times e^{(-t/143\mu s)}$$

ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟตัวอย่างค่ากระแสไฟฟ้าผ่านที่รูปคลื่น 0.25/100  $\mu s$  ขนาด 20 kA

สำหรับที่รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่านขนาด 10/350  $\mu s$  เลือกใช้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$k = 0.93$$

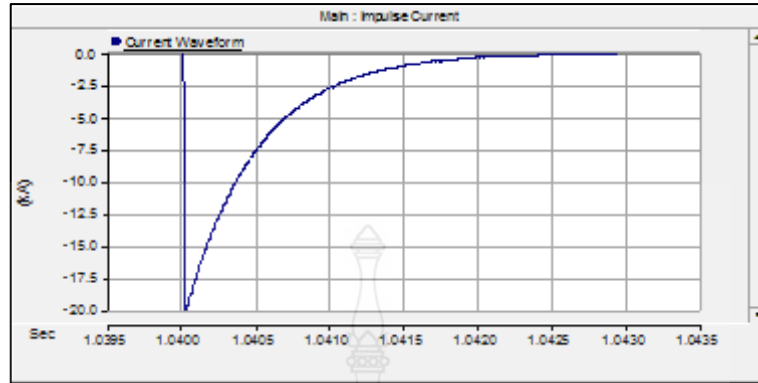
$$T_1 = 19 \mu s$$

$$T_2 = 485 \mu s$$

แทนค่าในสมการที่ (3.14)

$$I(t) = \frac{I}{0.993} \times \frac{(t/0.93\mu s)^{10}}{1+(t/0.93\mu s)} \times e^{(-t/485\mu s)}$$

ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟตัวอย่างค่ากระแสฟ้าผ่าที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ขนาด 20 kA

### 3.3.2 กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike)

P.Yutthagowith และ N.Pattanadech (2016) ได้นำเสนอการปรับปรุงด้วยการวิเคราะห์ตามเทคนิค Least-Square Prony สำหรับอิมพัลส์ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่า ซึ่งได้เลือกใช้รูปแบบ Wave form ของกระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลา [34] ดังสมการนี้

$$I(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

โดยเลือกใช้กรณีที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ไม่มีสัญญาณรบกวนขนาด 8/20  $\mu$ s ซึ่งกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

$$A = 2.1501$$

$$\alpha = 6.25 \times 10^4$$

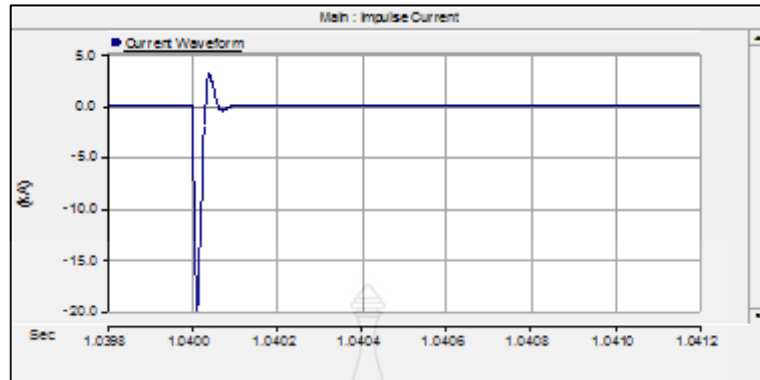
$$\omega = 16.75 \text{ rad / sec}$$

แทนค่ามาแทนในสมการที่ (3.5)

$$I(t) = 2.1501e^{-6.25 \times 10^4 t} \sin(16.75t)$$

ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.17





รูปที่ 3.17 กราฟตัวอย่างค่ากระแสฟ้าผ่าที่รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ขนาด 20 kA

จากนั้นทำข้อมูลของสมการฟ้าผ่าที่รูปคลื่นทั้ง 3 แบบ ได้แก่ 0.25/100  $\mu$ s 10/350 และ 8/20  $\mu$ s มาสร้างสมการและออกแบบวงจรใน โปรแกรม PSCAD รวมทั้งได้การใช้คำสั่ง Control Panel สร้างแถบควบคุมการเลือกคุณลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าได้ ดังนี้

Type : สามารถเลือกรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าได้ 3 แบบ คือ การเกิดฟ้าผ่าทางตรงที่รูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s สำหรับฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมา รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s สำหรับฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมา และรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s สำหรับฟ้าผ่าทางอ้อม

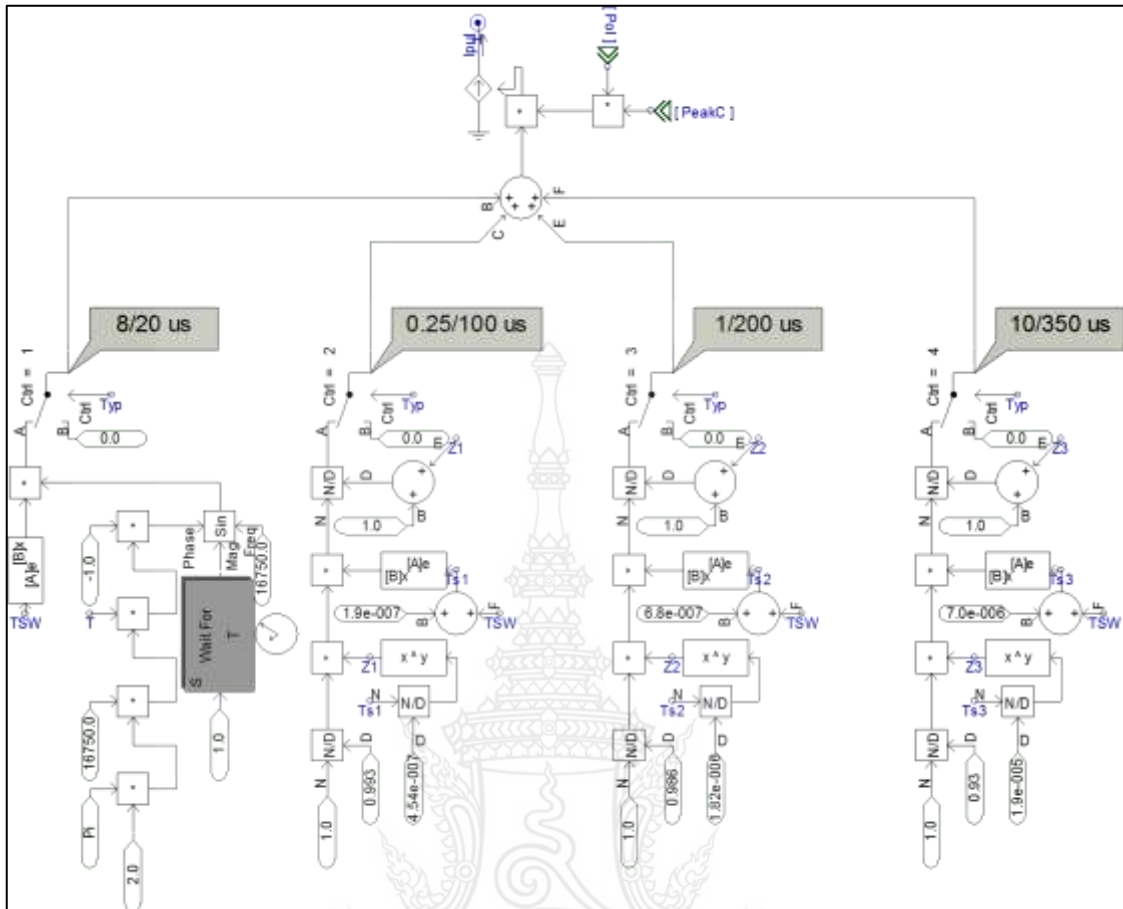
Peak : สามารถเลือกขนาดของค่ากระแสฟ้าผ่าได้ ตั้งแต่ 0 - 100 kA

Polarity : สามารถเลือกขั้วของฟ้าผ่าได้ 2 รูปแบบ คือ ฟ้าผ่าขั้วลบ และ ฟ้าผ่าขั้วบวก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ฟ้าผ่าขั้วบวก ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นได้บ่อยในประเทศไทย

Phase : สามารถเลือกตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่าในสายไฟฟ้าด้าน AC ได้ 3 เฟส คือ เฟส A เฟส B และ เฟส C ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในสายไฟฟ้าก่อนเข้าหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA ในตำแหน่งเฟส B

Degree : สามารถเลือกมุมของการเกิดฟ้าผ่าตามลักษณะของกราฟรูปคลื่น Sine Wave ตั้งแต่ มุม 0 องศา ถึง มุม 360° ซึ่งในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ที่ มุม 270° เนื่องจากฟ้าผ่าขั้วลบที่มีค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ มุม 270°

ดังนั้นสมการของฟ้าผ่า และ Control Panel สามารถนำมาสร้างในโปรแกรม PSCAD ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 วงจรไฟฟ้าในโปรแกรม PSCAD

Impulse Current Generator Control				
Type	Peak	Polarity	Phase	Degree
4	100	Negative	3	360
3	20	Positive	2	0
2	20	Positive	1	270
1	20	Positive	0	270

4 >>> 10/350 us  
 3 >>> 1/200 us  
 2 >>> 0.25/100 us  
 1 >>> 8/20 us

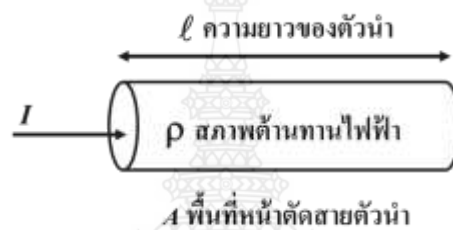
รูปที่ 3.19 หน้าต่าง Control การจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้า

### 3.4 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เมื่อดำเนินการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แล้วเสร็จ จึงได้นำมาสร้างแบบจำลองอย่างเป็นระบบในโปรแกรม PSCAD โดยมีการคำนวณค่าความต้านทานในสายไฟดังนี้

#### 3.4.1 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Line Resistance)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าพบว่าความต้านทานของโลหะตัวนำอันเกิดจากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มีความสัมพันธ์ดังนี้



#### รูปที่ 3.20 ความต้านทานของตัวนำทรงกระบอก

การคำนวณความต้านทานของตัวนำสายไฟสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (3.6)

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \quad (3.6)$$

โดยที่

$R_{dc}$  = ความต้านทานสายตัวนำ หน่วย  $\Omega$

$\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้า

$l$  = ความยาวของสายตัวนำ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดสายตัวนำ

อุณหภูมิมีผลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยตรง จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางแยกตามวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3.3

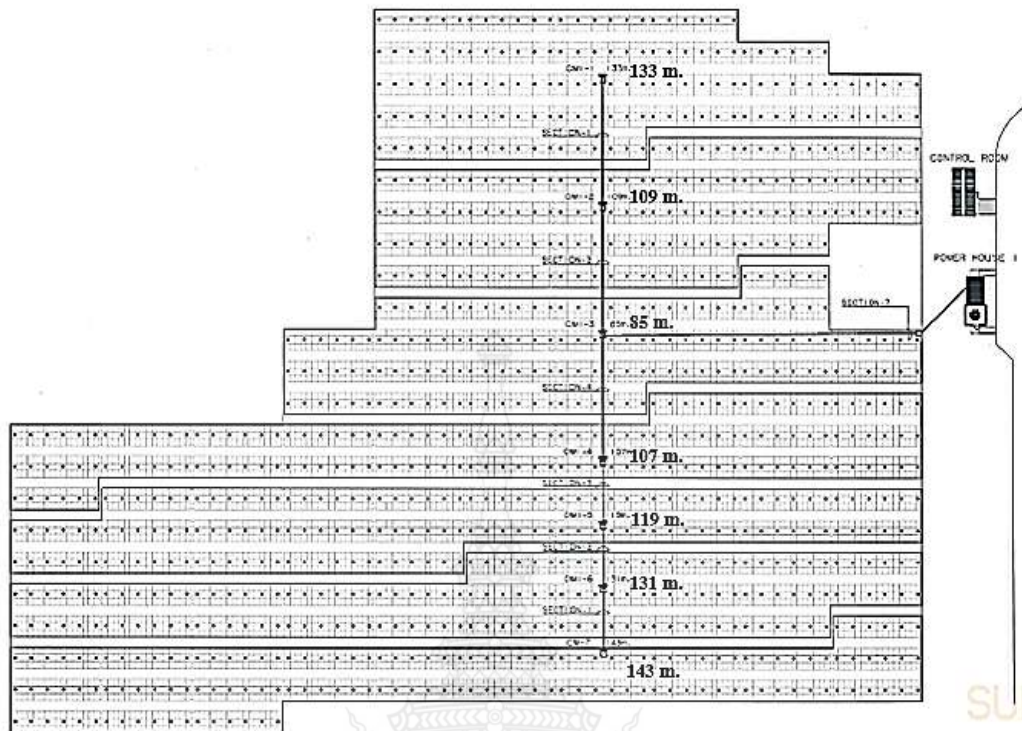
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุบางชนิด [35]

ประเภทตัวนำ	สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ที่อุณหภูมิ 20 °C ( $\mu\Omega.cm$ )	สัมประสิทธิ์ ( $\alpha$ ) ที่อุณหภูมิ 20 °C (1/°C)
Aluminium	2.83	0.0039
Brass	6.4 -8.4	0.002
Bronze	13-18	0.0005
Copper-hard drawn	1.77	0.00382
Copper- annealed	1.72	0.00393
Iron	10	0.005
Silver	1.59	0.0038
Sodium	4.3	0.0044
Steel	12-18	0.001-0.005

เนื่องจากอุณหภูมิของสายตัวนำที่นำมาใช้การคำนวณ มีค่า 25°C ดังนั้นจึงได้ เลือกใช้สมการที่ (3.7) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายไฟ

$$R_T = R_{T_0} \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (3.7)$$

โดยที่ระยะความยาวของสายไฟแต่ละจุดจากตู้ Combinerbox ถึง Inverter ของ PV Array ทั้ง 7 กลุ่ม แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.21 ระยะความยาวของสายไฟจาก Combinerbox ถึง Inverter

จากรูปที่ 3.10 ข้อมูลของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการศึกษามีรายละเอียด คือ สายไฟที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตู้ Combinerbox ถึง Inverter มีลักษณะเป็นสายตัวนำทองแดงเดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ชนิดของสาย 0.6/1 kV XLPE (Cross-linked polyethylene) ขนาด  $1\text{C}\times 2\times 95\text{ mm}^2$  เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำขนาด  $11.43\text{ mm}$  ดังนั้นการคำนวณหาความต้านทานของสายไฟในระยะความยาวสายในจุดต่อต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

ความต้านทานสายไฟ ( $R_1$ ) ระยะความยาวสาย  $133\text{ m}$  ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_1 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \times \frac{133\text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0229 \Omega$$

$$R_{1@25^{\circ}\text{C}} = 0.0229 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0233 \Omega$$



ความต้านทานสายไฟ ( $R_2$ ) ระยะความยาวสาย 109 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_2 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{109 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0188 \Omega$$

$$R_{2@25^\circ\text{C}} = 0.0188 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0191 \Omega$$

ความต้านทานสายไฟ ( $R_3$ ) ระยะความยาวสาย 85 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_3 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{85 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0146 \Omega$$

$$R_{3@25^\circ\text{C}} = 0.0146 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0148 \Omega$$

ความต้านทานสายไฟ ( $R_4$ ) ระยะความยาวสาย 107 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_4 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{107 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0184 \Omega$$

$$R_{4@25^\circ\text{C}} = 0.0184 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0187 \Omega$$

ความต้านทานสายไฟ ( $R_5$ ) ระยะความยาวสาย 119 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_5 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{119 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0205 \Omega$$

$$R_{5@25^\circ\text{C}} = 0.0205 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0208 \Omega$$

ความต้านทานสายไฟ ( $R_6$ ) ระยะความยาวสาย 131 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_6 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{131 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0225 \Omega$$

$$R_{6@25^\circ C} = 0.0225 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0229 \Omega$$

ความต้านทานสายไฟ ( $R_7$ ) ระยะความยาวสาย 143 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_7 = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{143 \text{ m}}{\pi (11.43 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0246 \Omega$$

$$R_{7@25^\circ C} = 0.0246 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0250 \Omega$$

สำหรับสายไฟที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างแผง PV Array ถึงตู้ Combinerbox มีลักษณะเป็นสายตัวนำทองแดงเดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 25 °C ชนิดของสาย 0.6/1 kV XLPE (Cross-linked polyethylene) ขนาด 1Cx2x4 mm<sup>2</sup> เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำขนาด 2.55 mm ดังนั้นการคำนวณหาความต้านทานของสายไฟสามารถคำนวณได้ ดังนี้

ความต้านทานสายไฟ ( $R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}$ ) ระยะความยาวสาย 2 m ที่อุณหภูมิ 25 °C แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ได้ค่าความต้านทานในสายไฟ ดังนี้

$$R_{8-14} = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \times \frac{2 \text{ m}}{\pi (2.55 \times 10^{-3} \text{ m} / 2)^2} = 0.0069 \Omega$$

$$R_{8-14@25^\circ C} = 0.0069 \times \{1 + 0.00382(25 - 20)\} = 0.0070 \Omega$$

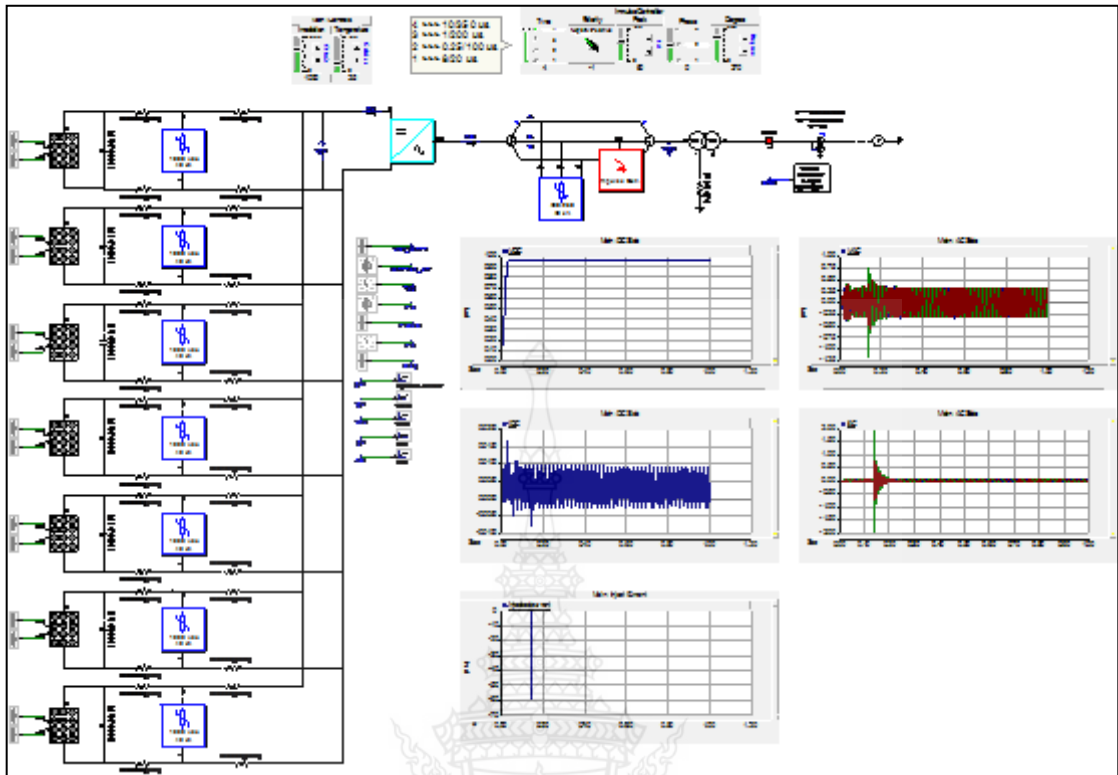
เนื่องจากค่าความต้านทานสาย  $R_{8-14@25^\circ C}$  มีทั้งหมด 24 กลุ่ม PV Array ดังนั้นค่าความต้านทานสายไฟในแต่ละกลุ่ม PV Array จึงมีค่าเท่ากับ  $0.0070/24 = 0.0003 \Omega$

สำหรับค่าความต้านทาน ( $R_{15}$ ) บริเวณจุดต่อลงกราวด์ที่หม้อแปลงขนาด 1,250 kVA จากการวัดค่าความต้านที่หน้างานจริง มีค่าเท่ากับ 0  $\Omega$  ดังนั้นค่าความต้านทานสายไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม PSCAD สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.4** แสดงค่าความต้านทานของสายไฟฟ้าตามความระยะสายในจุดต่างๆ

ความต้านทาน สายไฟ	ระยะสาย (เมตร)	R ที่อุณหภูมิ 20 °C ( $\Omega$ )	R ที่อุณหภูมิ 25 °C ( $\Omega$ )
$R_1$	133	0.0229	0.0233
$R_2$	109	0.0188	0.0188
$R_3$	85	0.0146	0.0148
$R_4$	107	0.0184	0.0187
$R_5$	119	0.0205	0.0208
$R_6$	131	0.0255	0.0229
$R_7$	143	0.0246	0.0250
$R_8$ - $R_{14}$	2	0.0069	0.0003
$R_{15}$	-	0	0

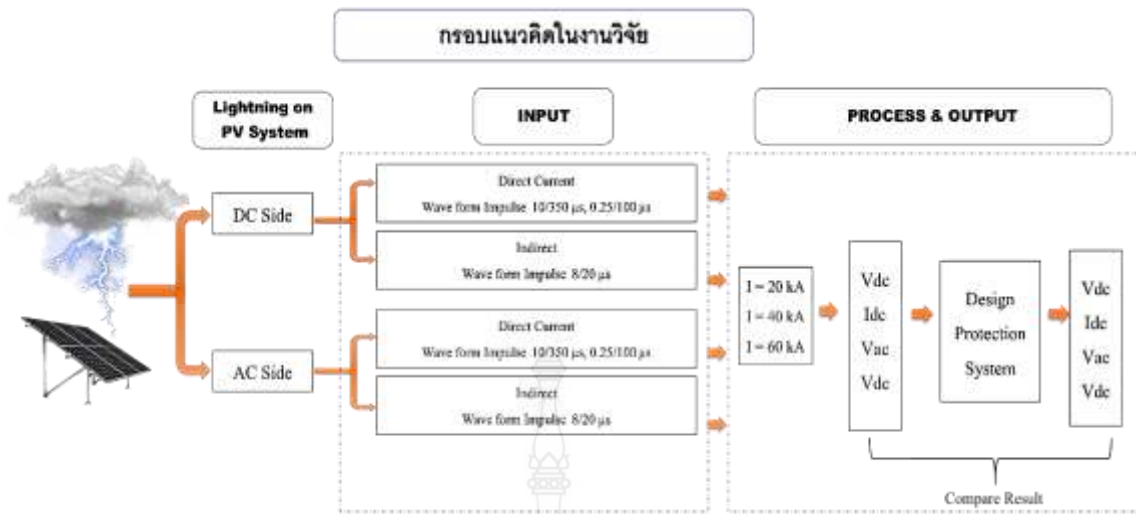
เมื่อทำการสร้างส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แล้วเสร็จได้นำมาสร้างเป็นแบบโมเดลเพื่อใช้ในการประมวลผลวิเคราะห์และสรุปผลของกรณีการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินตามแบบจำลองแสดงในรูปที่ 3.22 โดยผลการทดลองจะนำเสนอไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับต่อไป



รูปที่ 3.22 แบบจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยตามกรอบแนวคิด

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองการเกิดเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าลงในสายไฟฟ้าในบริเวณ 2 จุด คือ จุดที่ 1 บริเวณสายไฟฟ้าด้าน DC อยู่ช่วงสายไฟจาก แผง โซลาร์เซลล์ ถึง อินเวอร์เตอร์ และ จุดที่ 2 ด้าน AC บริเวณสายไฟเฟส B ก่อนเข้าหม้อแปลง โดยแบ่งลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าเป็น 2 ลักษณะ คือ ฟ้าผ่าทางตรงและฟ้าผ่าของอ้อม ที่ขนาดค่ากระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA จากนั้นทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของค่าแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในกรณีก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงตามกรอบแนวคิดในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 กรอบแนวคิดในการศึกษาวิจัย





## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ข้อมูล

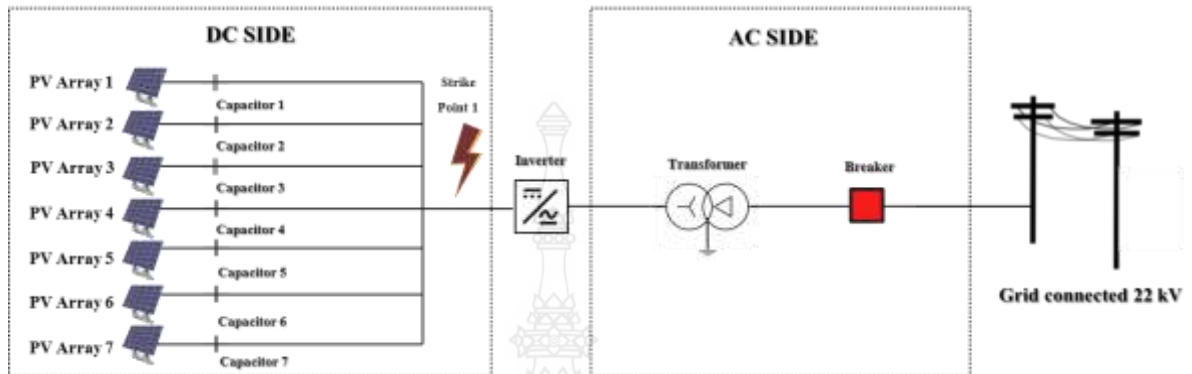
รายละเอียดของบทนี้ได้แสดงผลถึงการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่มีอัตรากำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW โดยใช้โปรแกรมจำลองทางไฟฟ้า PSCAD Version 4.6 โดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าออกเป็น 3 หัวข้อหลักประกอบด้วย 1) กรณีฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Strike) ของฟ้าผ่าลำแรกที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 10/350  $\mu$ s 2) กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำต่อมาที่มีรูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 0.25/100  $\mu$ s ตามมาตรฐานของ วสท. EIT Standard 2007-53 3) กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike) ที่กำหนดรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ามีขนาดเท่ากับ 80/20  $\mu$ s ตามมาตรฐานของ IEC 62475

จากกรณีการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่า 3 หัวข้อหลักในข้างต้น ได้แบ่งการจำลองเหตุการณ์แยกออก 4 กรณี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล คือ 1) กรณีพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าด้าน DC กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA 2) กรณีพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าด้าน DC กรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA 3) กรณีพิจารณา ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าเฟส B ด้าน AC กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA 4) กรณีพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าเฟส B ด้าน AC กรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิกัดค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA โดยแสดงผลในรูปแบบตารางข้อมูลและรูปกราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าดังต่อไปนี้

## 4.1 ไฟฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Strike)

### 4.1.1 กรณีฟ้าผ่าลำแรก (10/350 $\mu$ s) ด้าน DC

#### 4.1.1.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



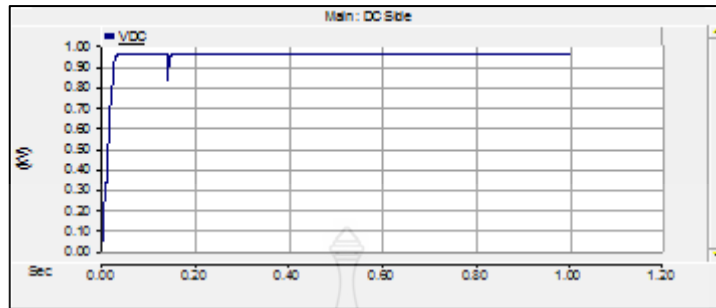
รูปที่ 4.1 การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{\text{inject}}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)
20	0.832	-5.124	3.240	-10.434
40	0.702	-11.526	6.281	-20.852
60	0.570	-18.729	9.322	-31.269

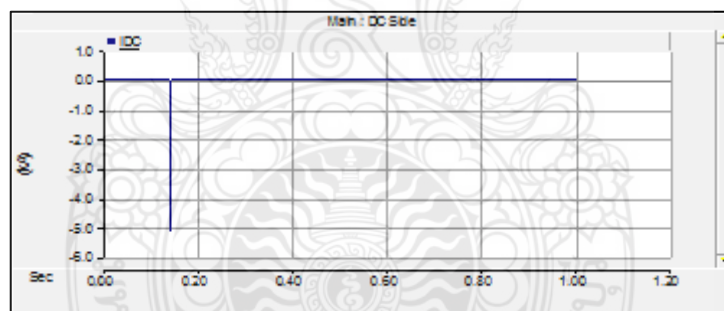
จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำแรกที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางได้มาจากกราฟรูปคลื่นไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.2 - 4.13

ก) กระแสฟ้าผ่า 20 kA



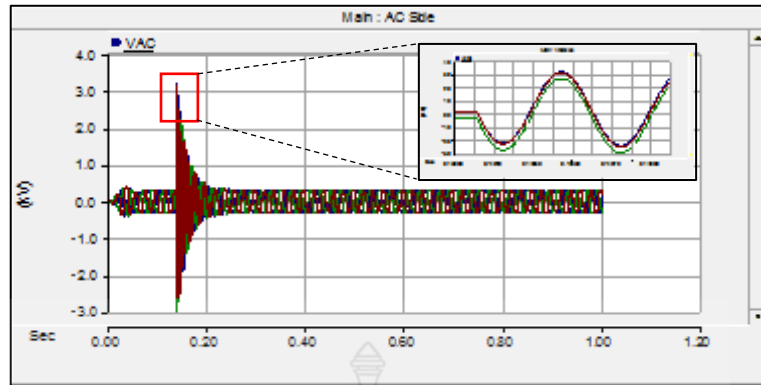
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.832 kV



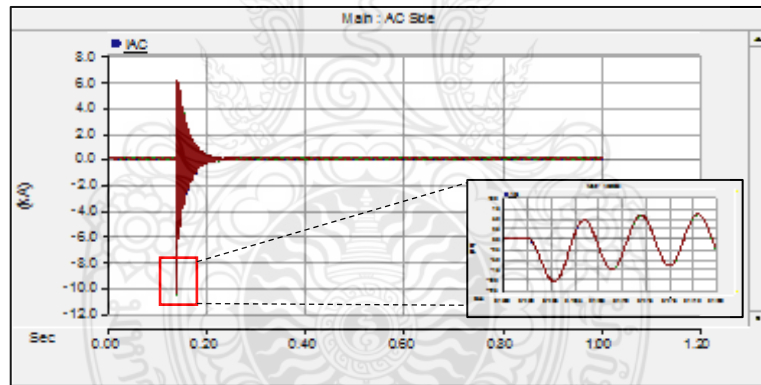
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ -5.241 kA



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

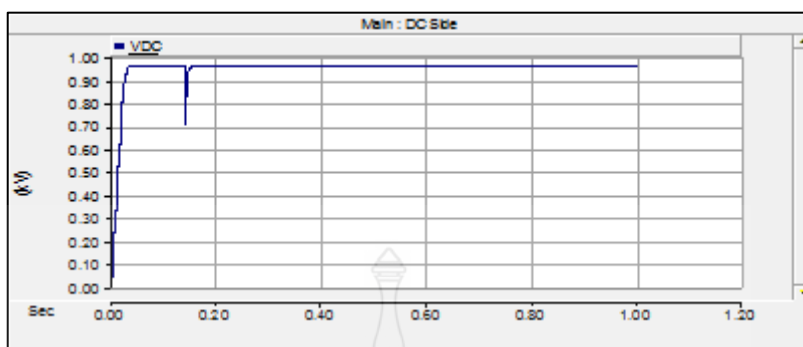
จากรูปที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 3.240 kV



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

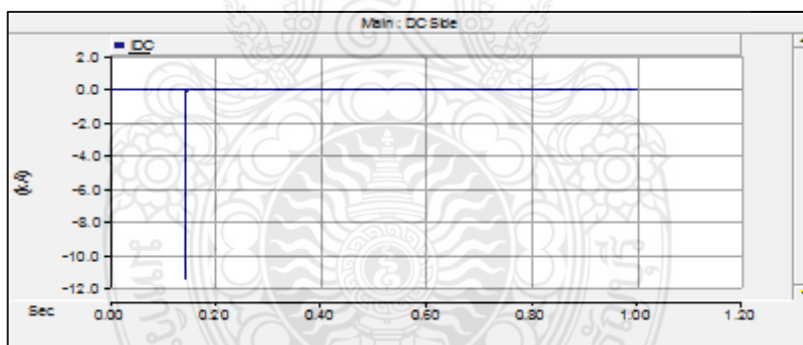
จากรูปที่ 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ -10.434 kA

ข) กระแสฟ้าผ่า 40 kA



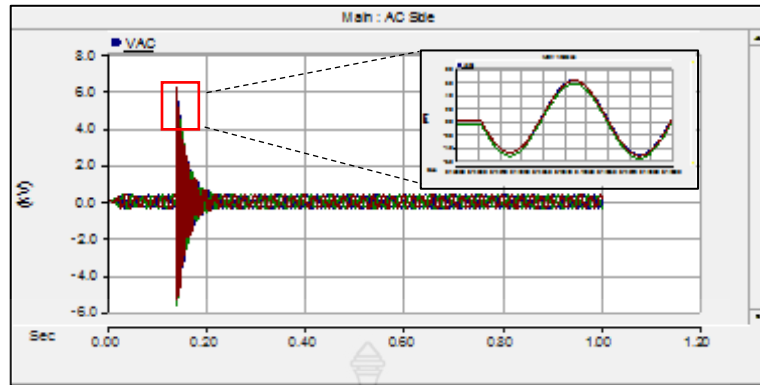
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.702 kV



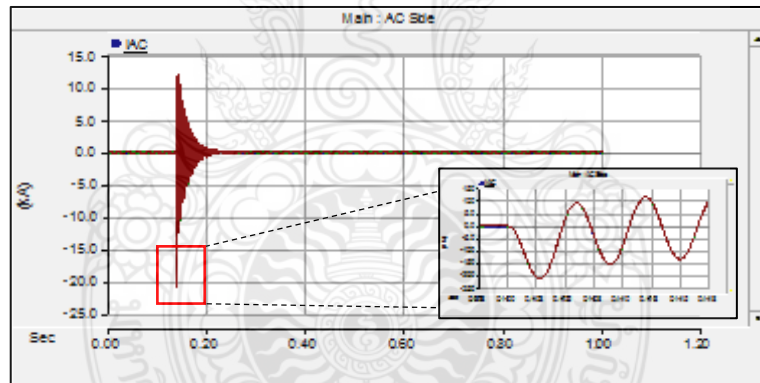
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -11.526 kA



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 6.281 kV

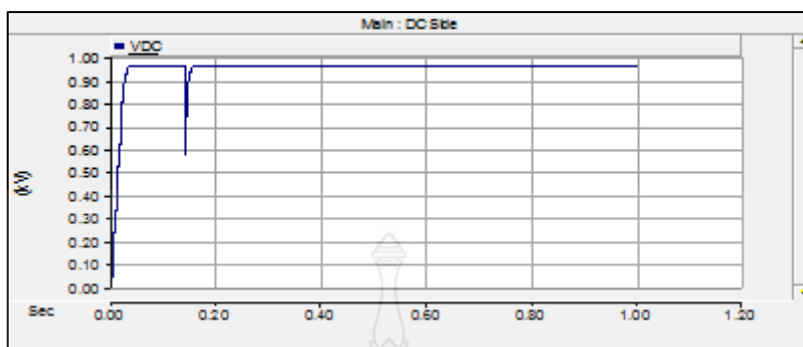


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -20.852 kA

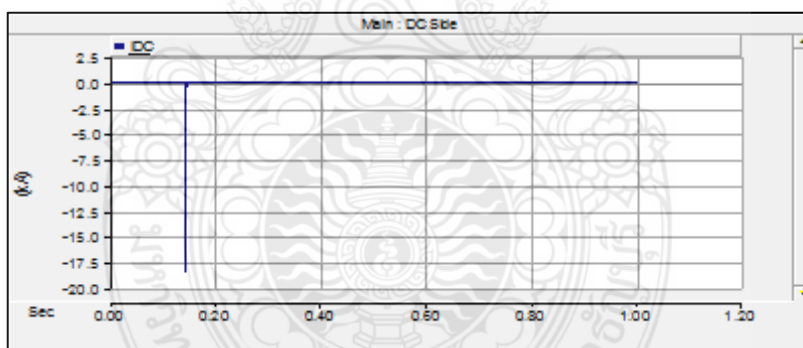


ค) กระแสฟ้าผ่า 60 kA



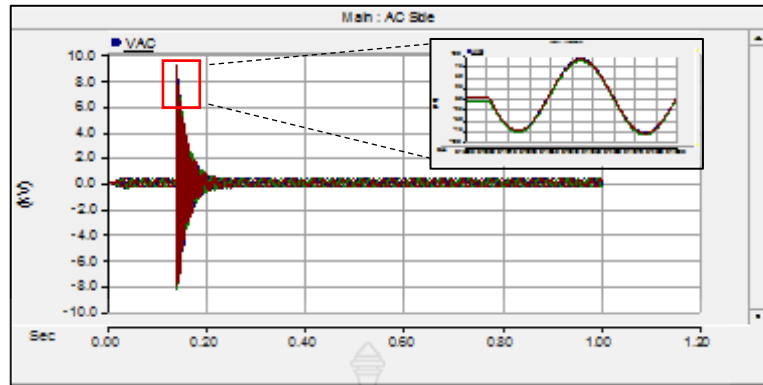
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.570 kV



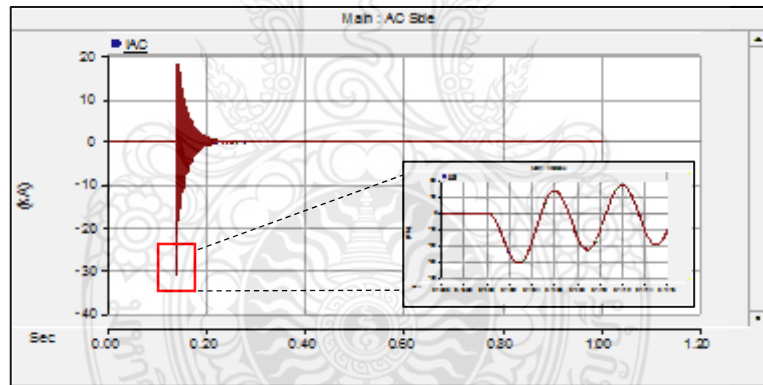
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.11 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -18.729 kA



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

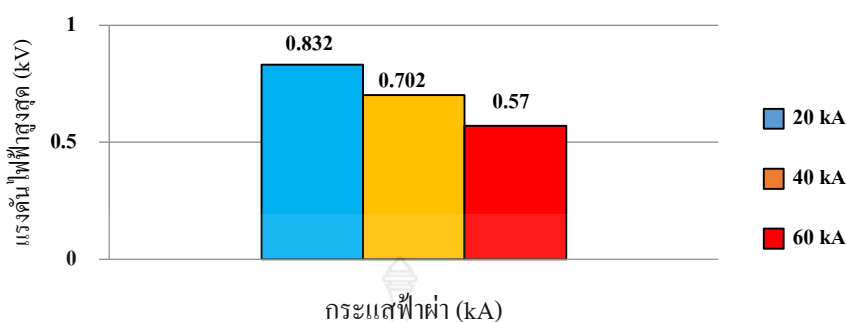
จากรูปที่ 4.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 9.322 kV



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.13 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -31.269 kA

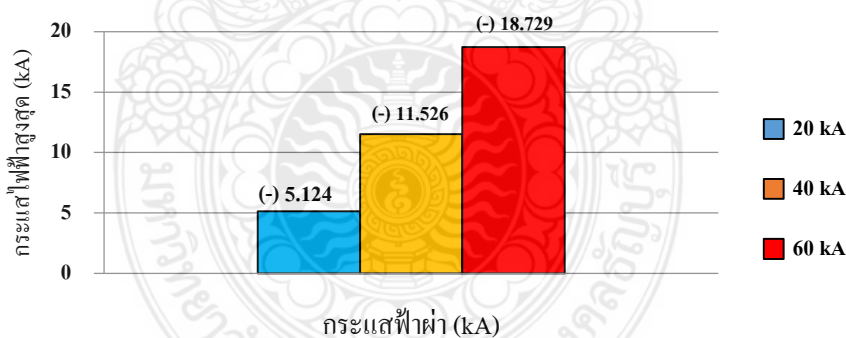
ง) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.14 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.14 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันลดลง เท่ากับ 0.832 kV 0.702 kV และ 0.570 kV ตามลำดับ

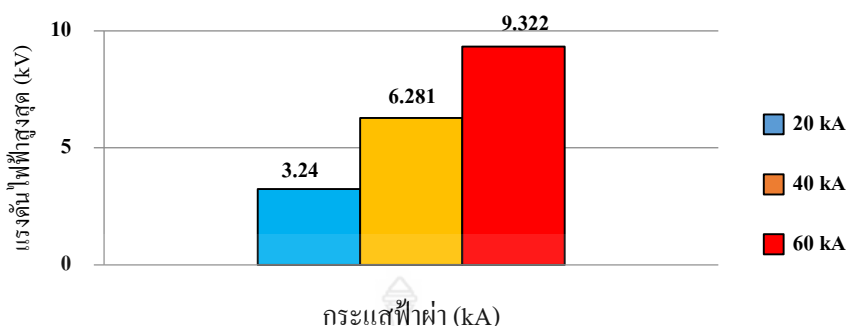
จ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.15 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.15 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -5.124 kA -11.526 kA และ -18.729 kA ตามลำดับ

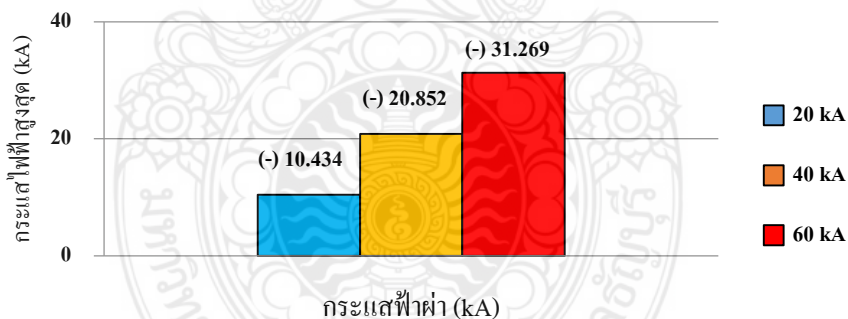
ฉ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟิวส์ 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.16 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์

จากรูปที่ 4.16 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์ กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟิวส์ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ 3.240 kV 6.281 kV และ 9.322 kV ตามลำดับ

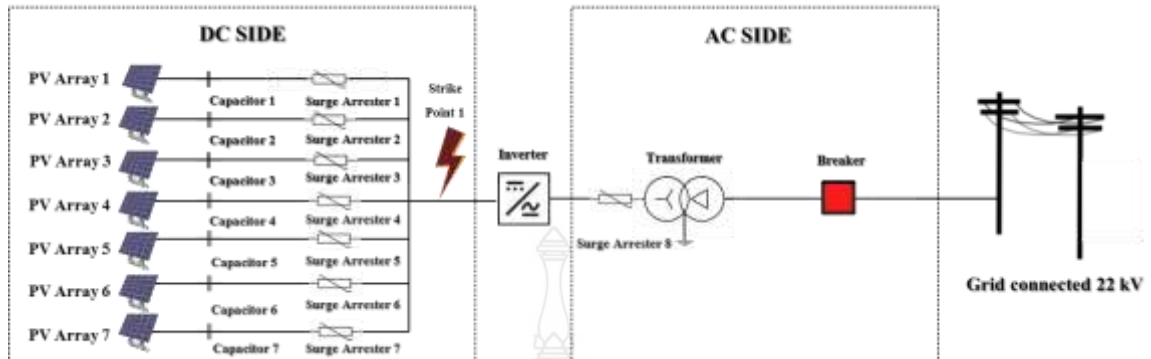
ช) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟิวส์ 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.17 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์

จากรูปที่ 4.17 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์ กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟิวส์ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -10.34 kA -20.852 kA และ -31.269 kA ตามลำดับ

#### 4.1.1.2 ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



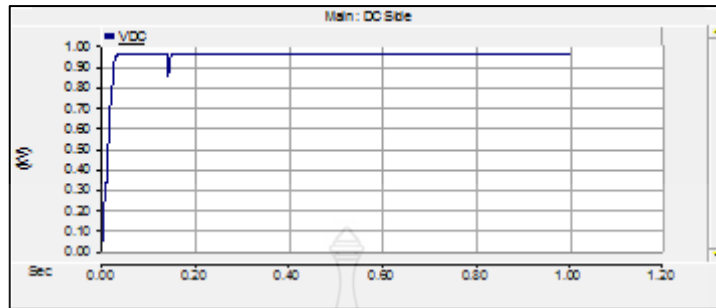
รูปที่ 4.18 การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่า  
ลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.849	-0.223	0.411	-0.121
40	0.726	-0.241	0.411	-0.138
60	0.593	-0.289	0.411	-0.149

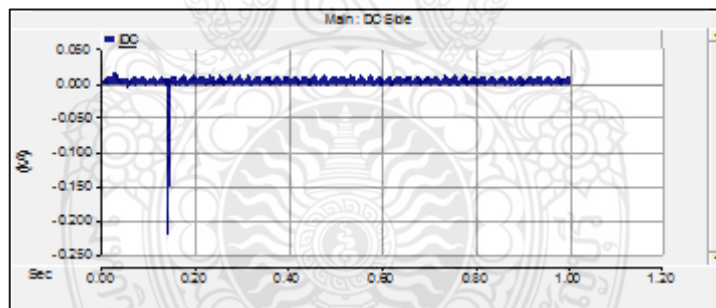
จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำแรกที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางได้มาจากกราฟรูปคลื่นไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.19 - 4.30

ก) กระแสฟ้าผ่า 20 kA



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

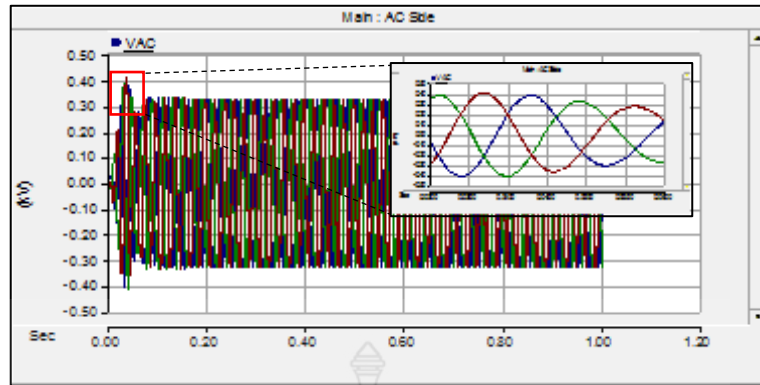
จากรูปที่ 4.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.849 kV



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

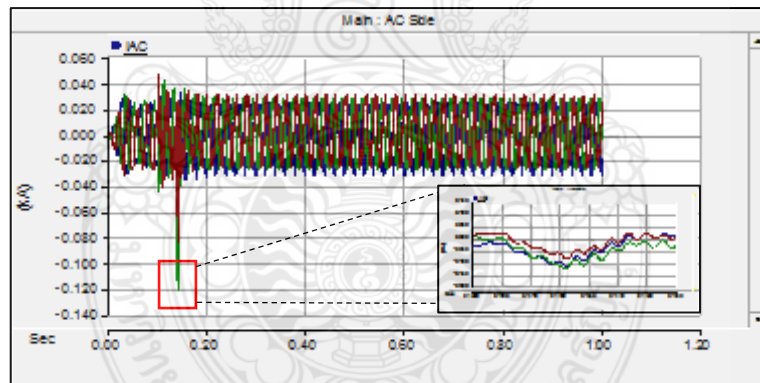
จากรูปที่ 4.20 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ -0.223 kA





รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

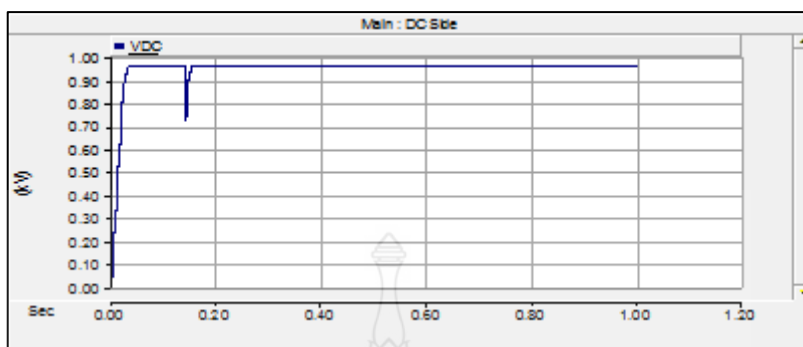
จากรูปที่ 4.21 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.411 kV



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

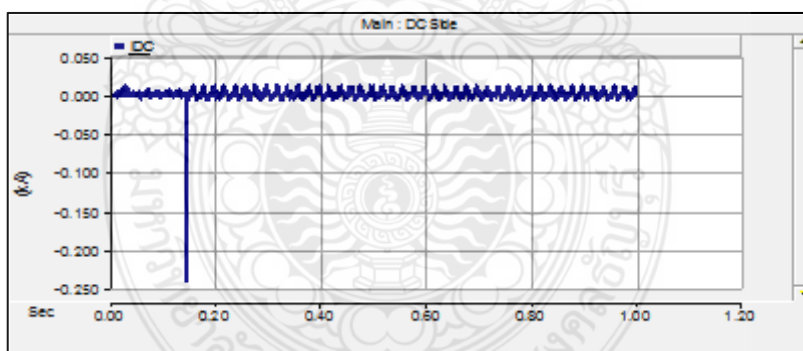
จากรูปที่ 4.22 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ -0.121 kA

ข) กระแสฟ้าผ่า 40 kA



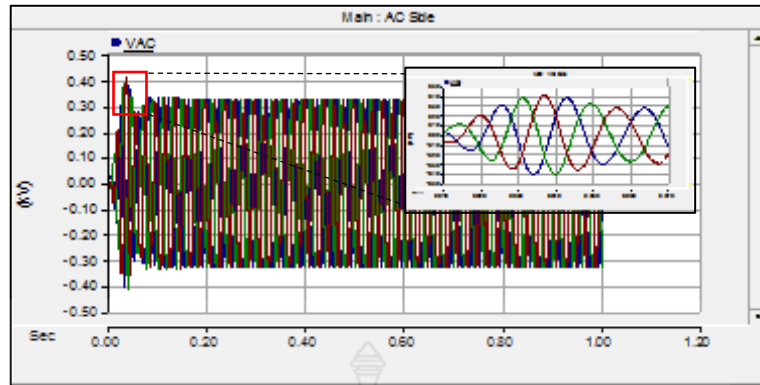
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.23 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.726 kV



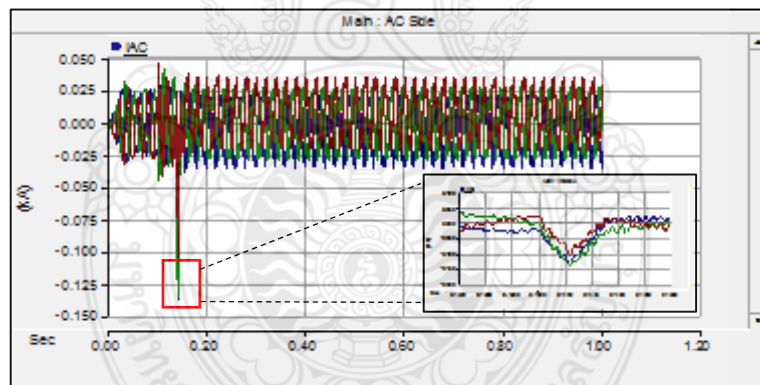
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.24 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -0.241 kA



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

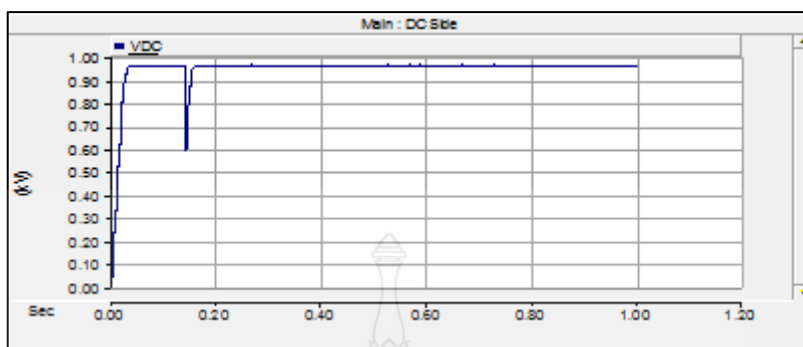
จากรูปที่ 4.25 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.411 kV



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

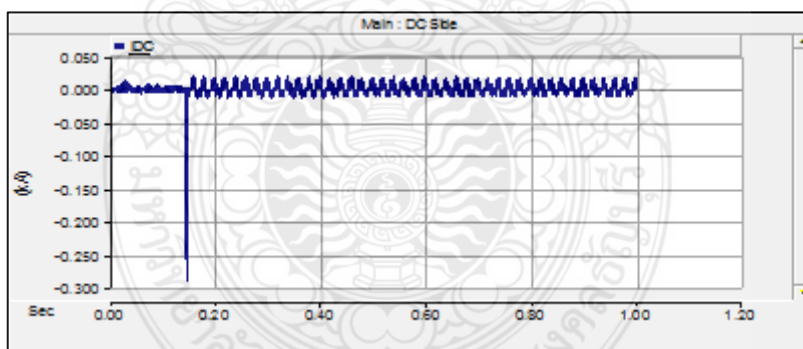
จากรูปที่ 4.26 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -0.138 kA

ค) กระแสฟ้าผ่า 60 kA



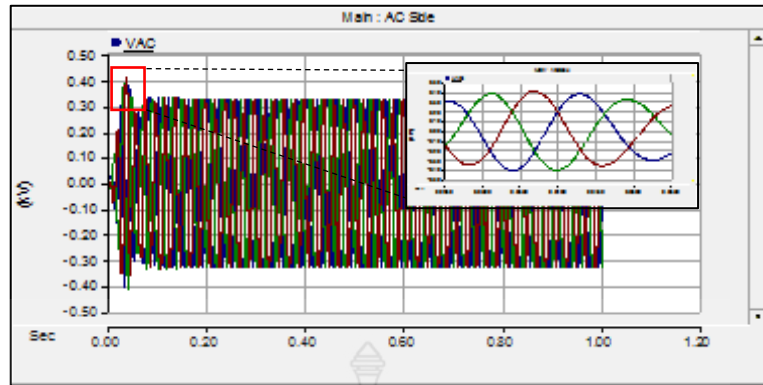
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.27 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.593 kV



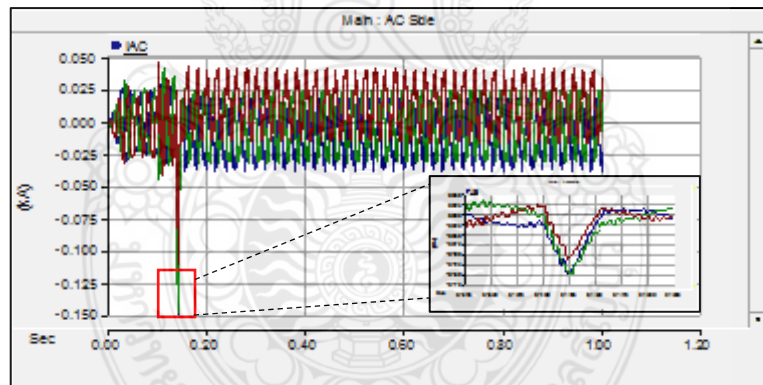
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.28 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ -0.289 kA



รูปที่ 4.29 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

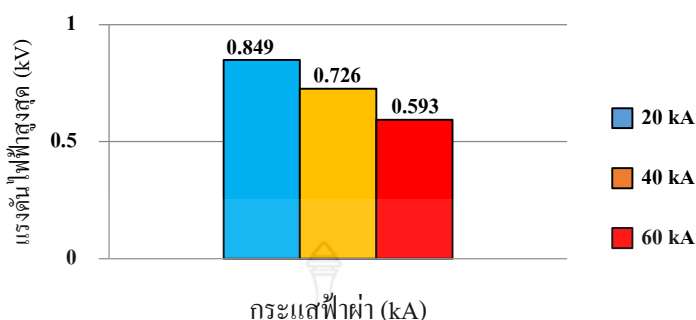
จากรูปที่ 4.29 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.411 kV



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน DC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.30 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA มีค่าเท่ากับ -0.149 kA

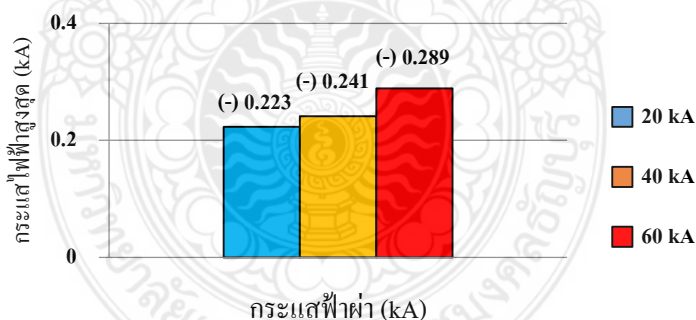
ง) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.31 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.31 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้าน DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันลดลง เท่ากับ 0.849 kV 0.726 kV และ 0.593 kV ตามลำดับ

จ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA

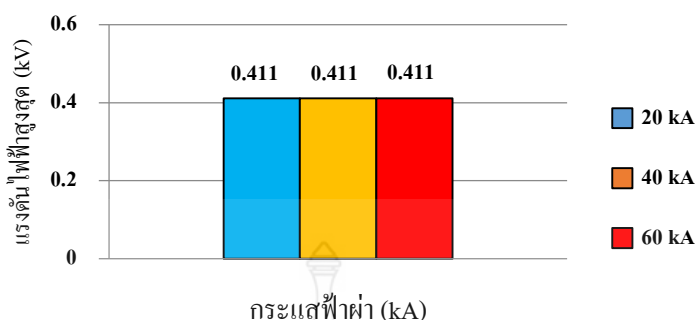


รูปที่ 4.32 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.32 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.223 kA -0.241 kA และ -0.289 kA ตามลำดับ



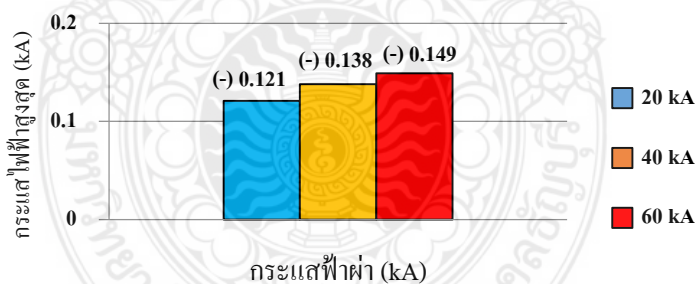
ณ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.33 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.33 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.411 kV

ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA

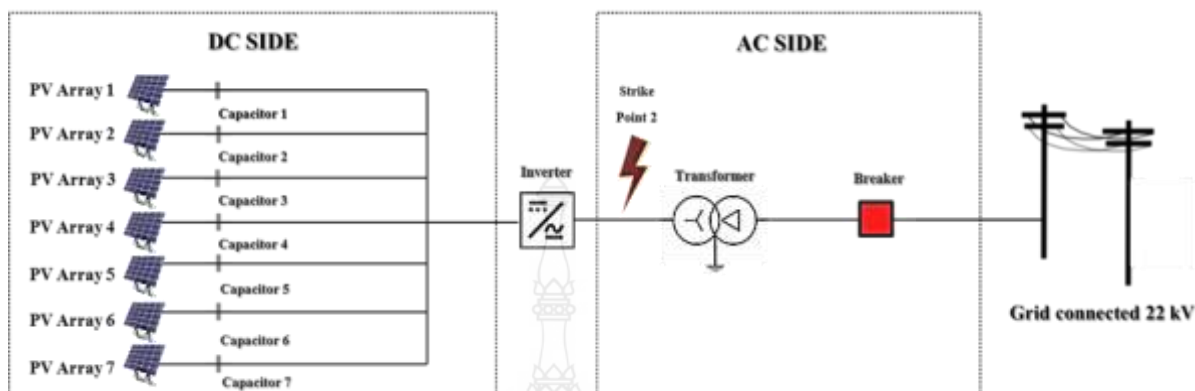


รูปที่ 4.34 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.34 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.121 kA -0.138 kA และ -0.149 kA ตามลำดับ

#### 4.1.2 กรณีฟ้าผ่าล่าช้า (10/350 $\mu$ s) ด้าน AC

##### 4.1.2.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



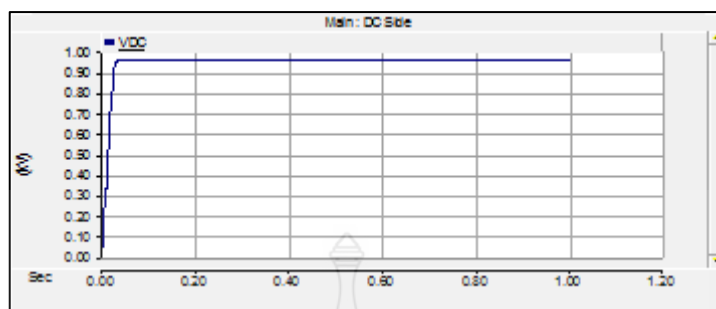
รูปที่ 4.35 การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน AC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าล่าช้ารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{\text{inject}}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)
20	0.962	0.021	9.095	19.891
40	0.962	0.039	18.509	39.782
60	0.962	0.059	27.924	59.671

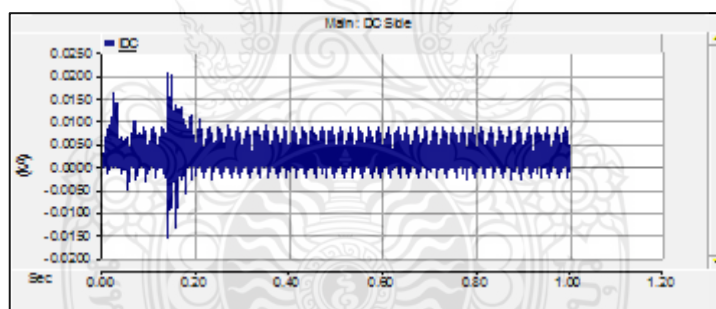
จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าล่าช้าที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางได้มาจากกราฟรูปคลื่นไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.36 - 4.47

ก) กระแสฟ้าผ่า 20 kA



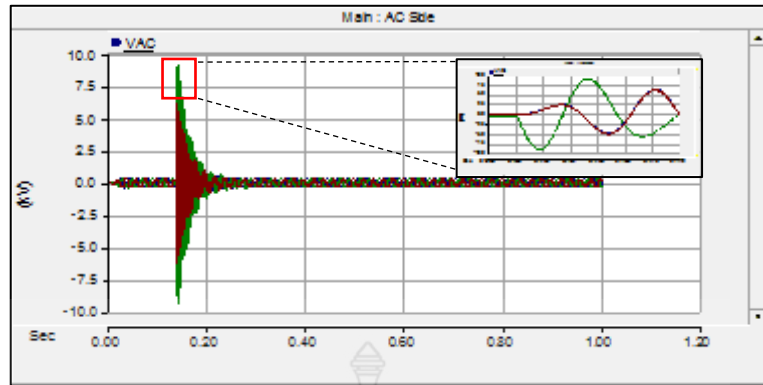
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.36 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



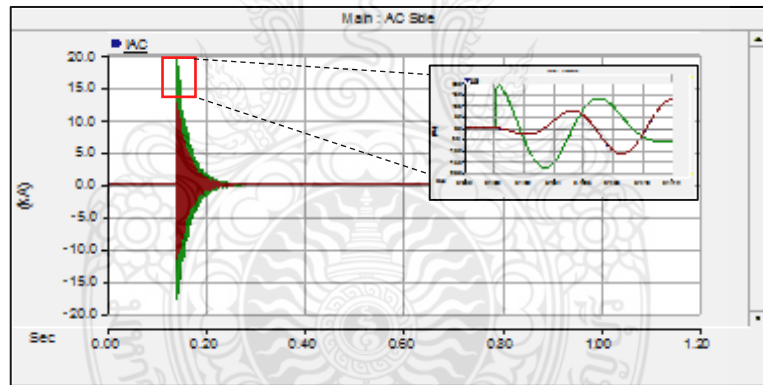
รูปที่ 4.37 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.37 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.021 kA



รูปที่ 4.38 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

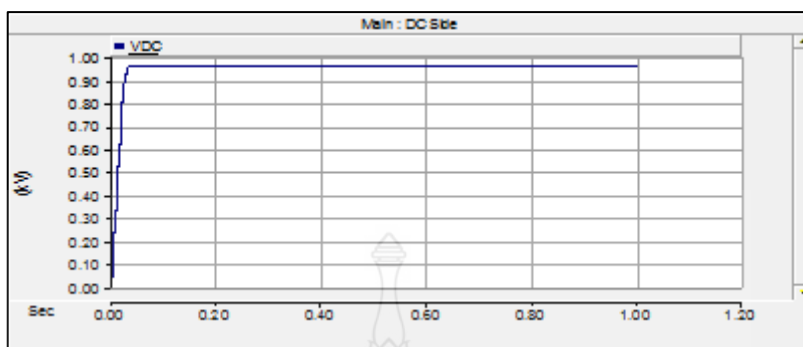
จากรูปที่ 4.38 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 9.095 kV



รูปที่ 4.39 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

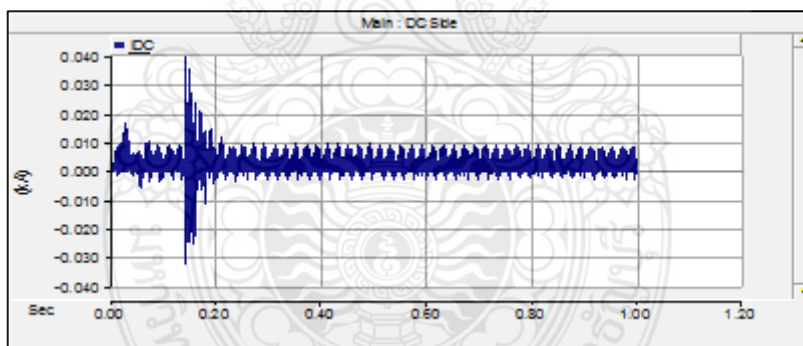
จากรูปที่ 4.39 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 19.891 kA

ข) กระแสฟ้าผ่า 40 kA



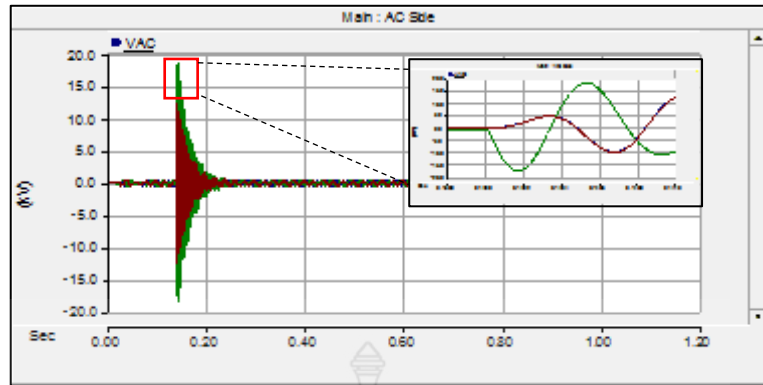
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.40 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



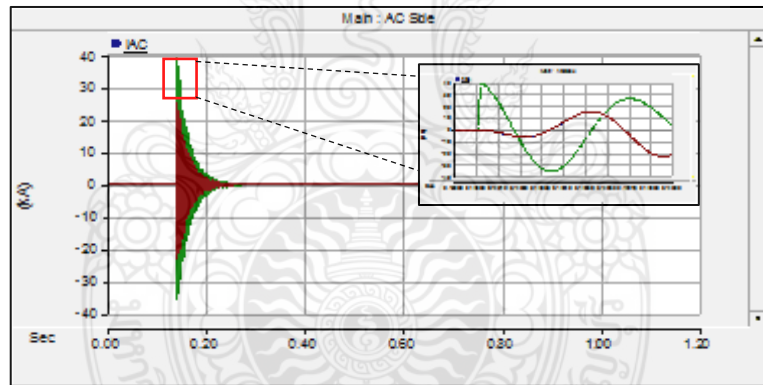
รูปที่ 4.41 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.41 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.039 kA



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.42 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคตกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 18.509 kV

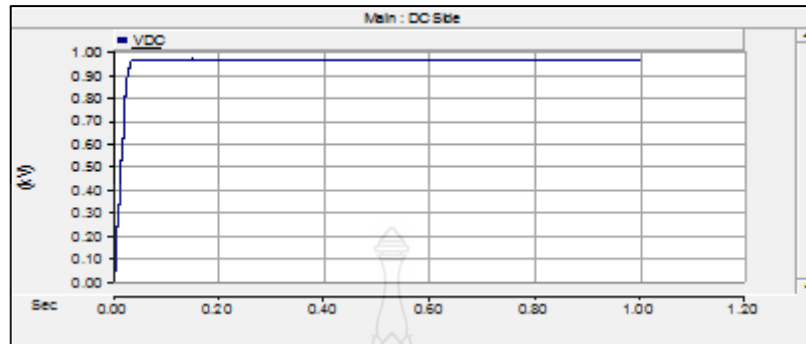


รูปที่ 4.43 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.43 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคตกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 39.782 kA

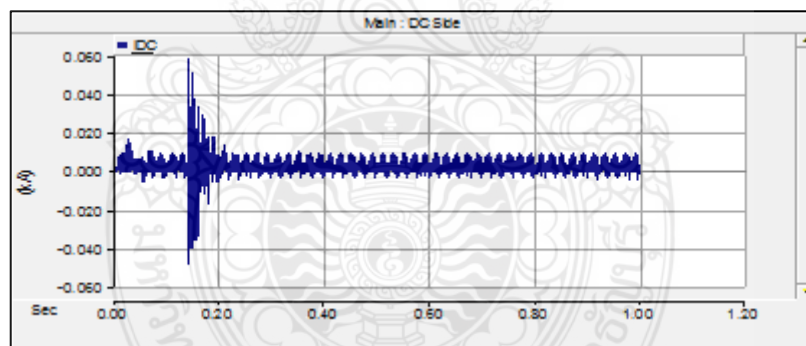


ค) กระแสฟ้าผ่า 60 kA



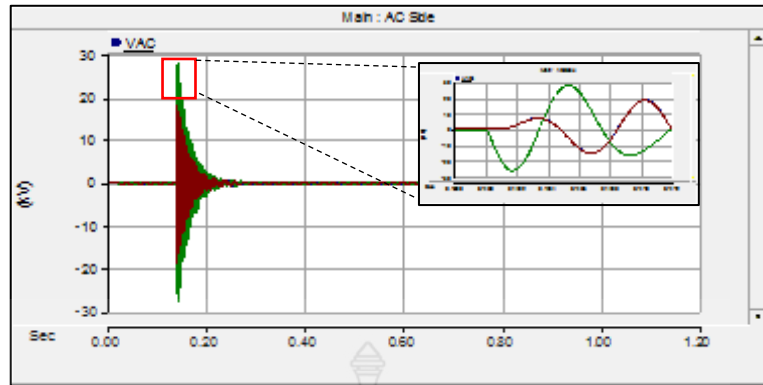
รูปที่ 4.44 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.44 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



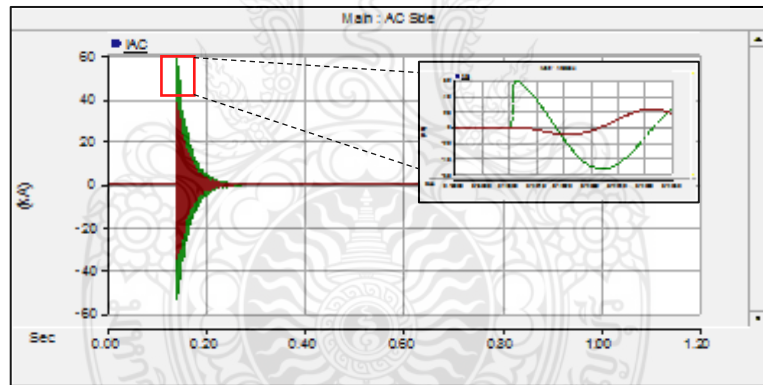
รูปที่ 4.45 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.45 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ากรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคัดค่ากระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.059 kA



รูปที่ 4.46 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

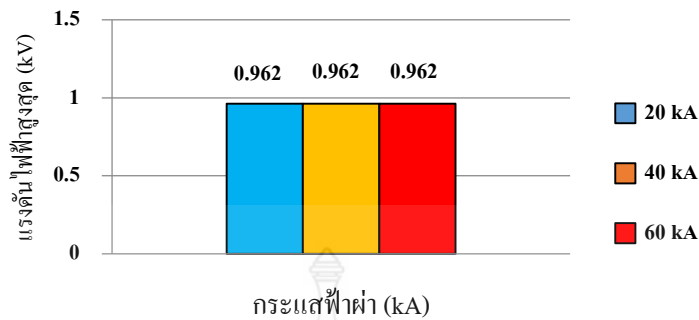
จากรูปที่ 4.46 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 27.924 kV



รูปที่ 4.47 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.47 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 59.671 kA

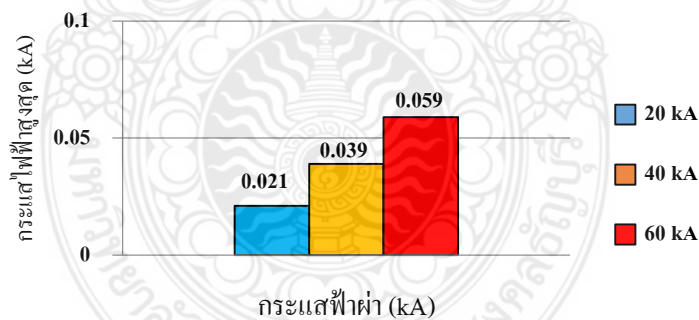
ง) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.48 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.48 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.96 kV

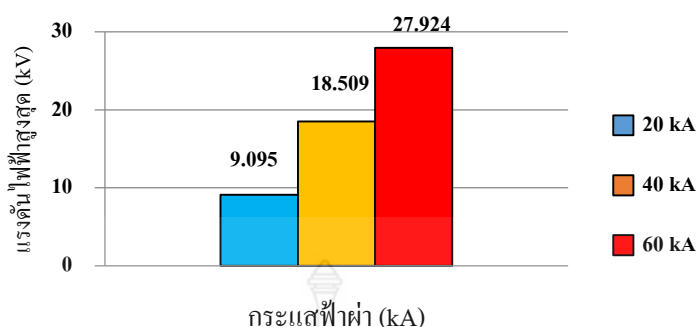
จ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.49 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.49 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.021 kA 0.039 kA และ 0.059 kA ตามลำดับ

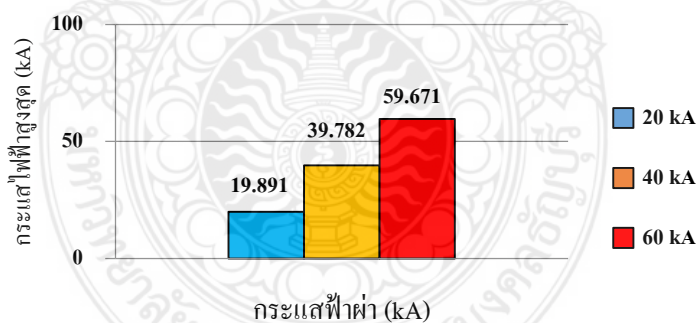
ฉ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟิวส์ 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.50 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์

จากรูปที่ 4.50 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์ กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟิวส์ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ 9.095 kV 18.509 kV และ 27.924 kV ตามลำดับ

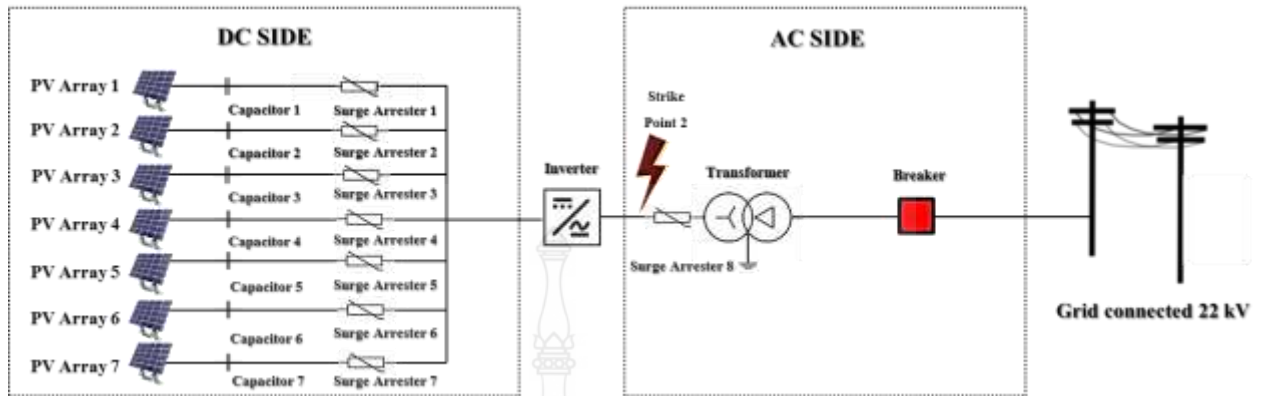
ช) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟิวส์ 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.51 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์

จากรูปที่ 4.51 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟิวส์ กรณีฟิวส์ทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟิวส์ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 19.891 kA 39.782 kA และ 59.671 kA ตามลำดับ

#### 4.1.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



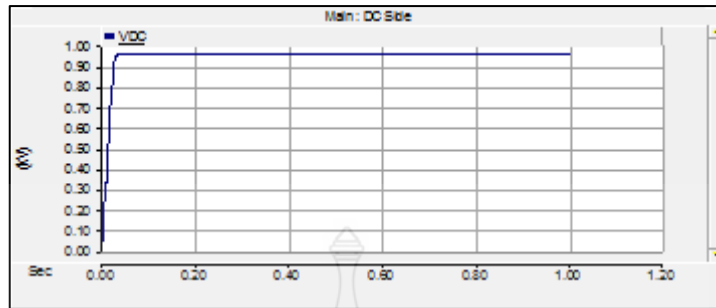
รูปที่ 4.52 การจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน AC กรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่า  
ลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{\text{inject}}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)
20	0.962	0.016	-0.976	16.914
40	0.962	0.016	-1.099	26.353
60	0.962	0.016	-1.190	32.086

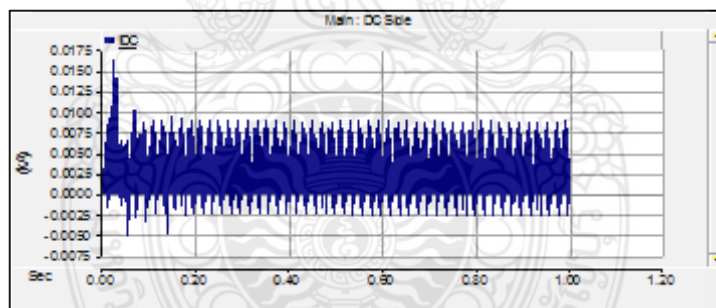
จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำแรกที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางได้มาจากกราฟรูปคลื่นไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.53 - 4.64

ก) กระแสฟ้าผ่า 20 kA



รูปที่ 4.53 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

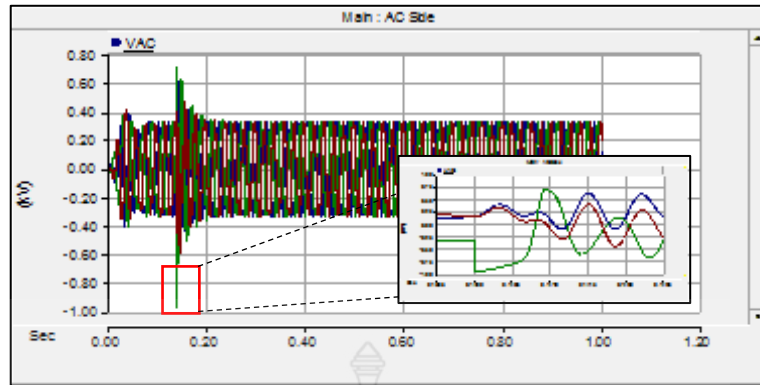
จากรูปที่ 4.53 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกิ้งกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



รูปที่ 4.54 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

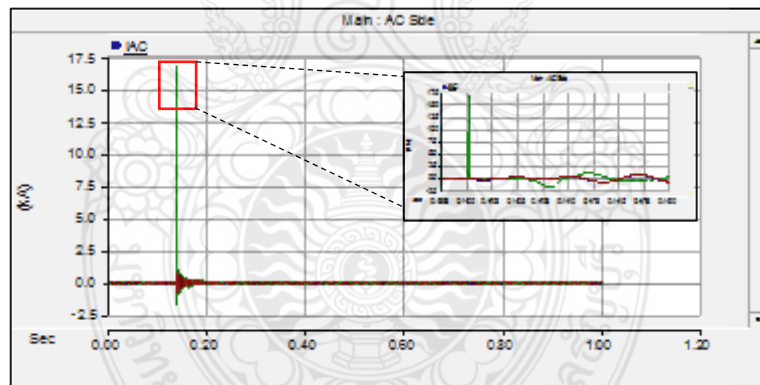
จากรูปที่ 4.54 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิคกิ้งกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 0.016 kA





รูปที่ 4.55 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

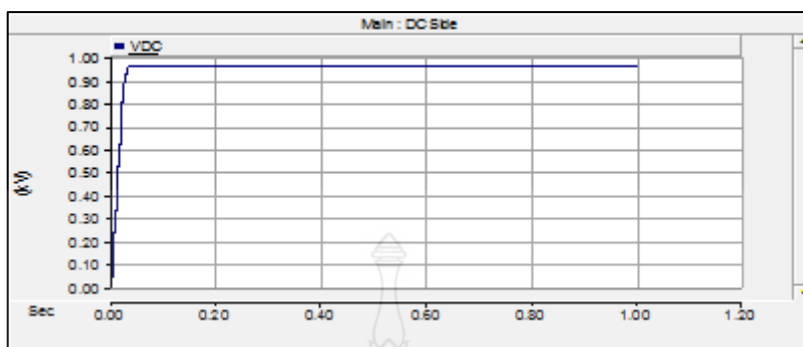
จากรูปที่ 4.55 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ -0.976 kV



รูปที่ 4.56 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 20 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

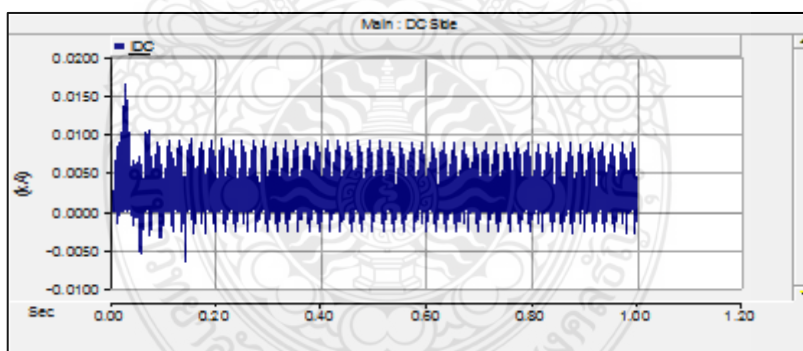
จากรูปที่ 4.56 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคกระแสฟ้าผ่า 20 kA มีค่าเท่ากับ 16.914 kA

ข) กระแสฟ้าผ่า 40 kA



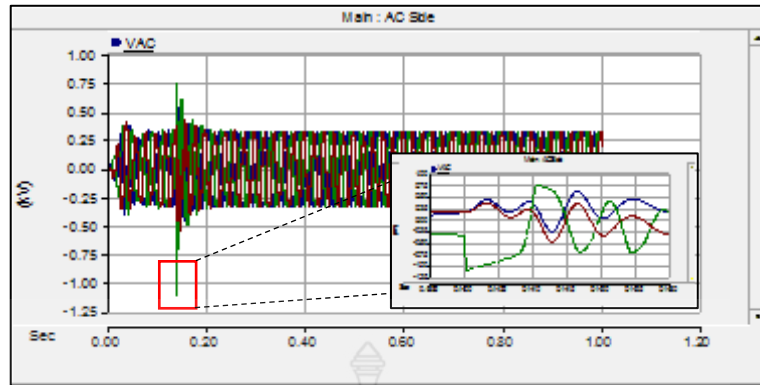
รูปที่ 4.57 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.57 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



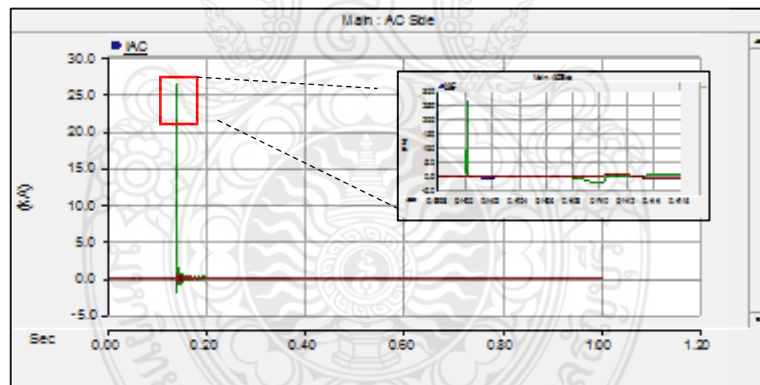
รูปที่ 4.58 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.58 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.016 kA



รูปที่ 4.59 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

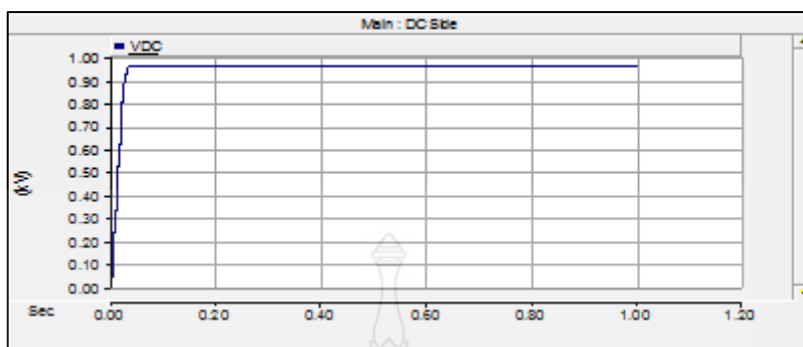
จากรูปที่ 4.59 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA มีค่าเท่ากับ -1.099 kV



รูปที่ 4.60 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 40 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

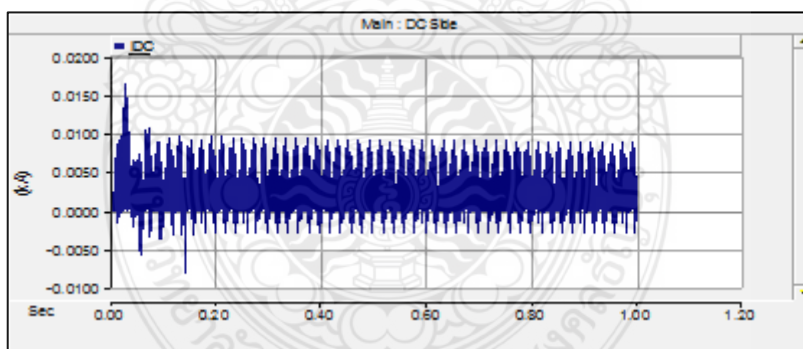
จากรูปที่ 4.60 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่กำลังกระแสฟ้าผ่า 40 kA มีค่าเท่ากับ 32.086 kA

ค) กระแสฟ้าผ่า 60 kA



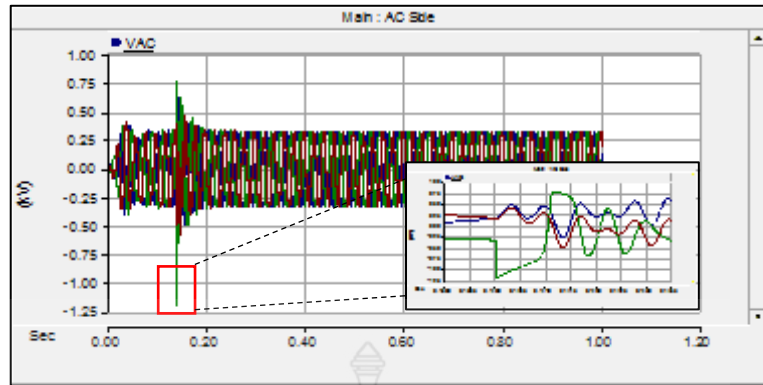
รูปที่ 4.61 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.61 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่า 60 kA มีค่าเท่ากับ 0.962 kV



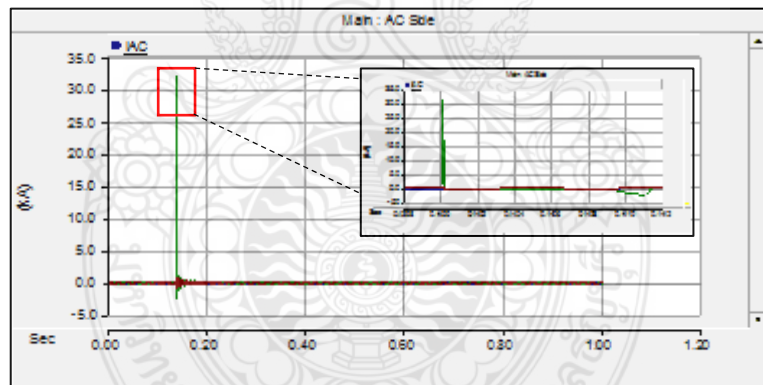
รูปที่ 4.62 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.62 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA มีค่าเท่ากับ 0.016 kA



รูปที่ 4.63 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

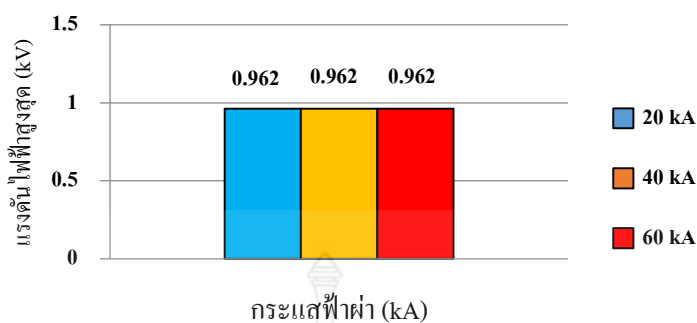
จากรูปที่ 4.63 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 60 kA มีค่าเท่ากับ -1.190 kV



รูปที่ 4.64 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรก (10/350  $\mu$ s, 60 kA) ด้าน AC ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.64 ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีที่เกิดฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA มีค่าเท่ากับ 32.086 kA

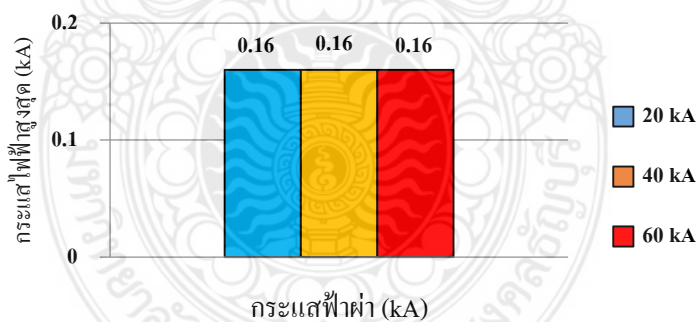
ง) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.65 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.65 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้าน DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.962 kV

จ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA

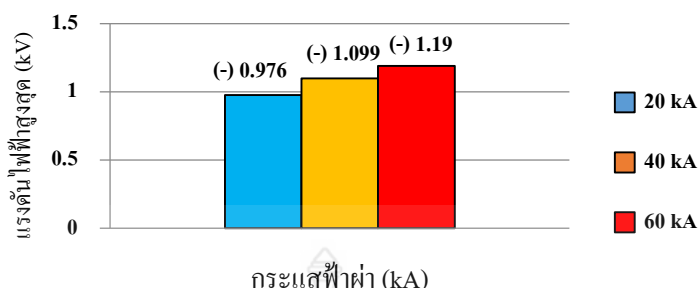


รูปที่ 4.66 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้สูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.66 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้สูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเท่ากัน เท่ากับ 0.016 kA



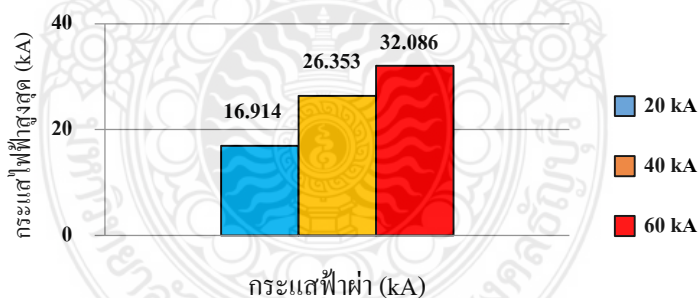
ฉ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.67 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.67 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.9756 kV -1.099 kV และ -1.190 kV ตามลำดับ

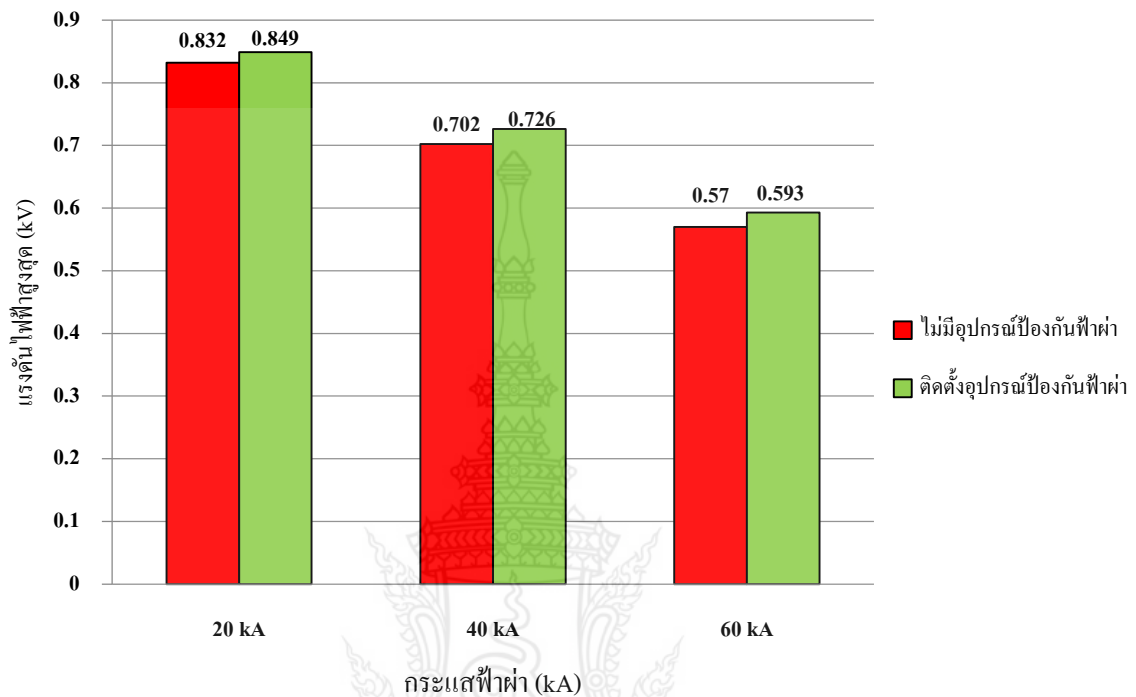
ช) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.68 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.68 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกที่มีค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 16.914 kA 26.353 kA และ 32.086 kA ตามลำดับ

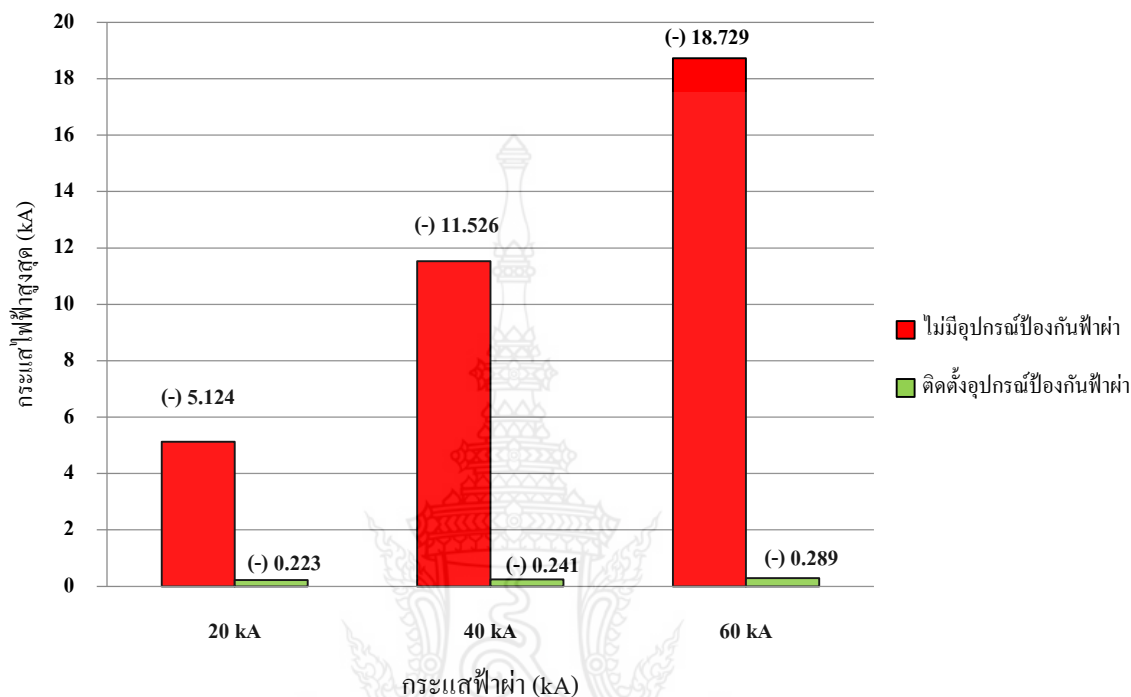
ช) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.69 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.69 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.017 kV 0.024 kV และ 0.023 kV ตามลำดับซึ่งมีผลเนื่องจากการรักษาสภาพแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์คาปาซิเตอร์ขนาด 10,000  $\mu\text{F}$  ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ

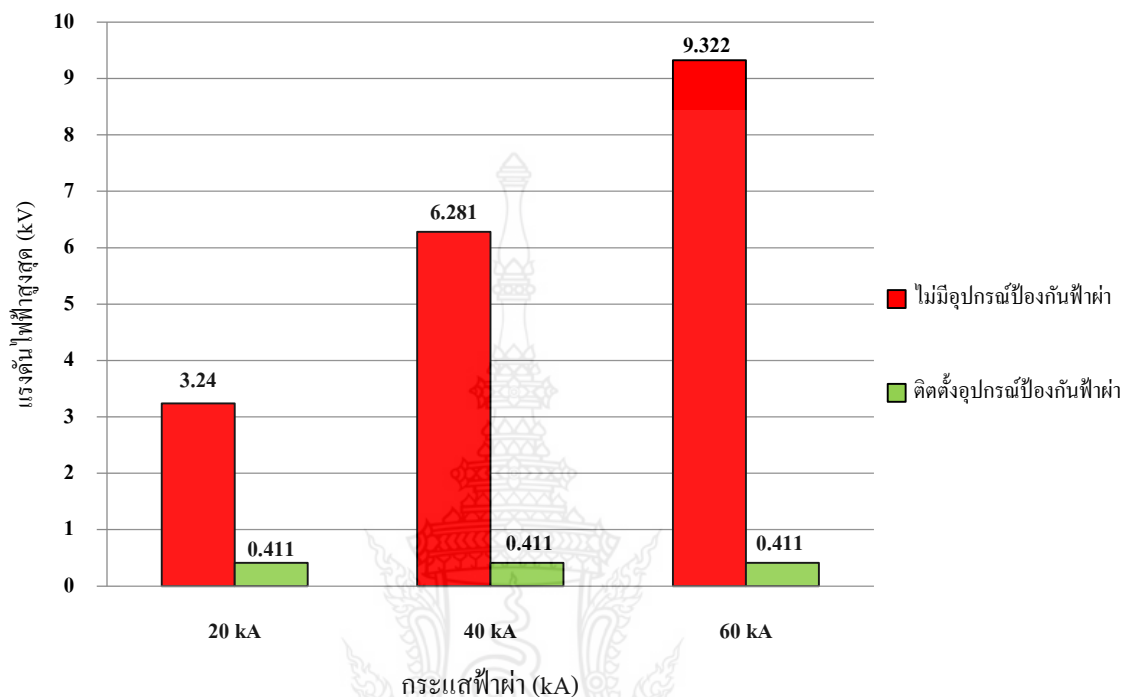
ฉ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.70 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.70 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 4.901 kA 11.285 kA และ 18.44 kA ตามลำดับ

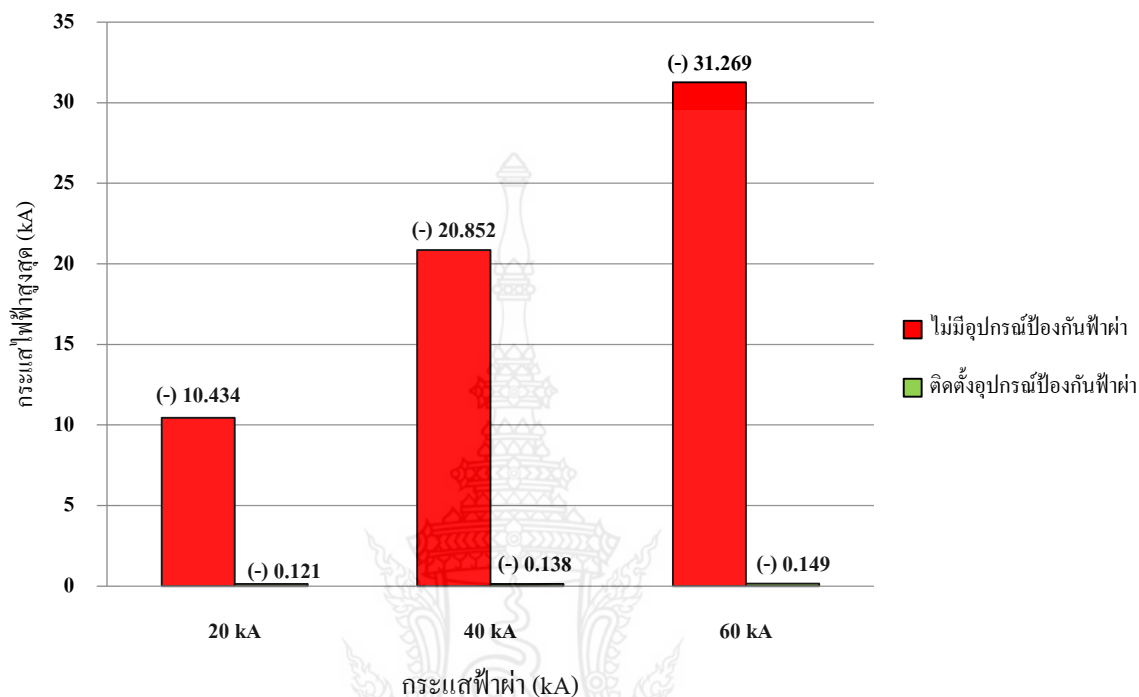
ญ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.71 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.71 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 2.829 kV 5.87 kV และ 8.911 kV ตามลำดับ

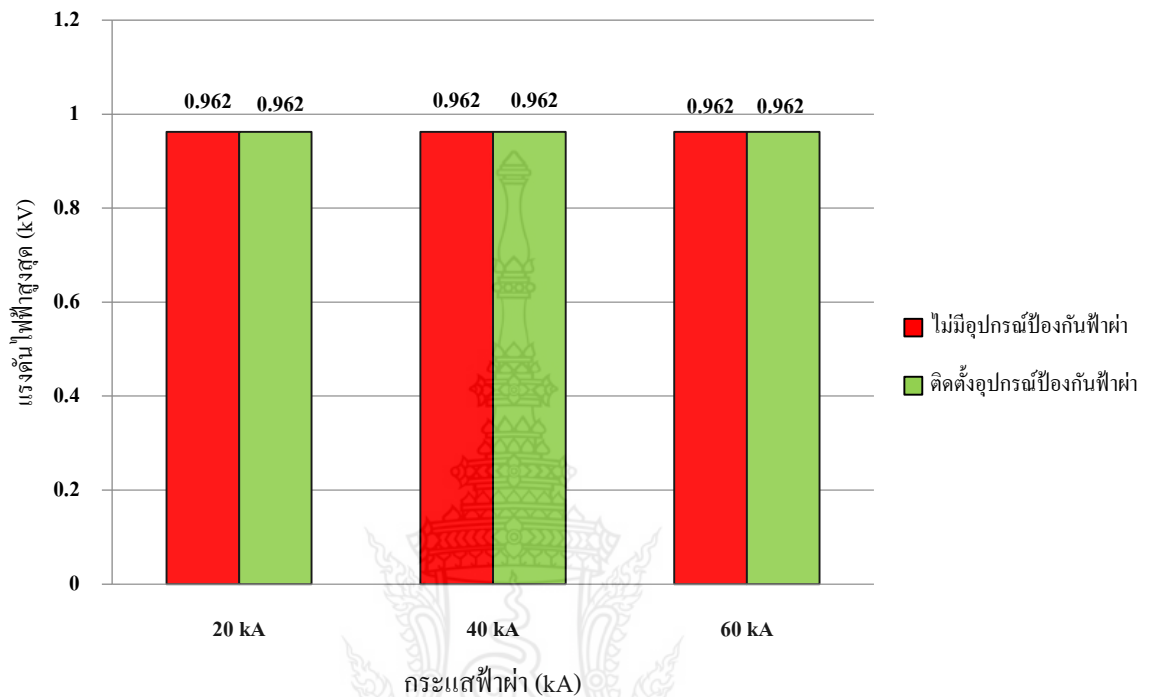
ฎ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.72 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.72 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 10.313 kA 20.714 kA และ 31.120 kA ตามลำดับ

ฎ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

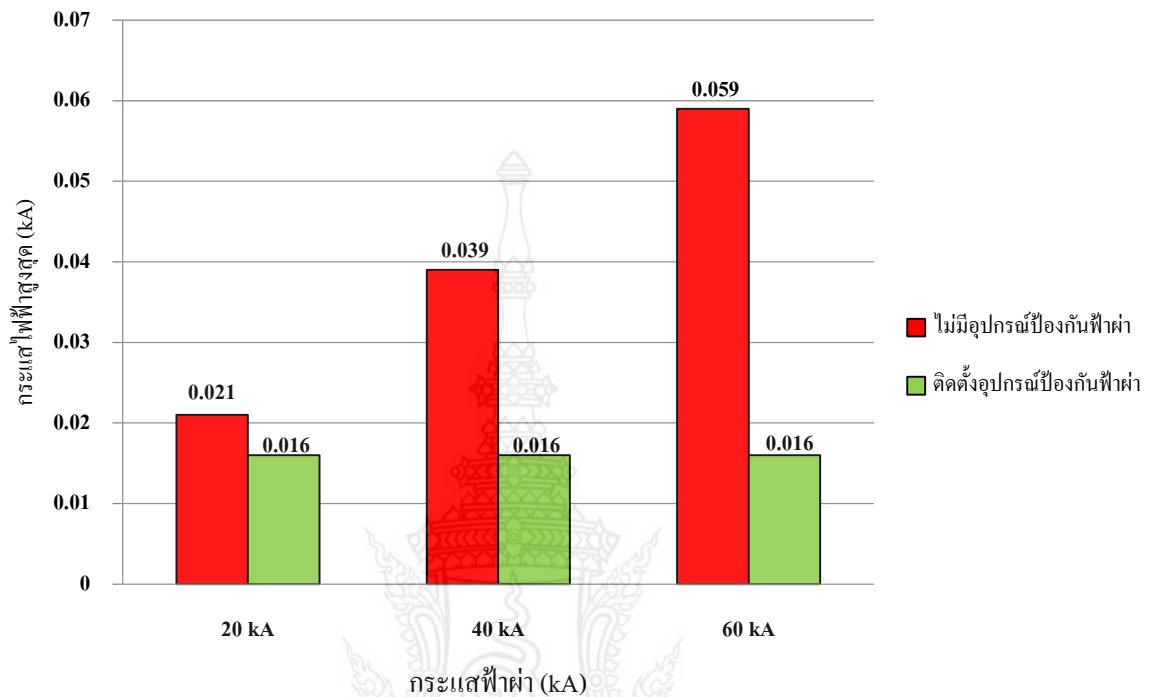


รูปที่ 4.73 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.73 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าเท่าเดิม เท่ากับ 0.962 kV



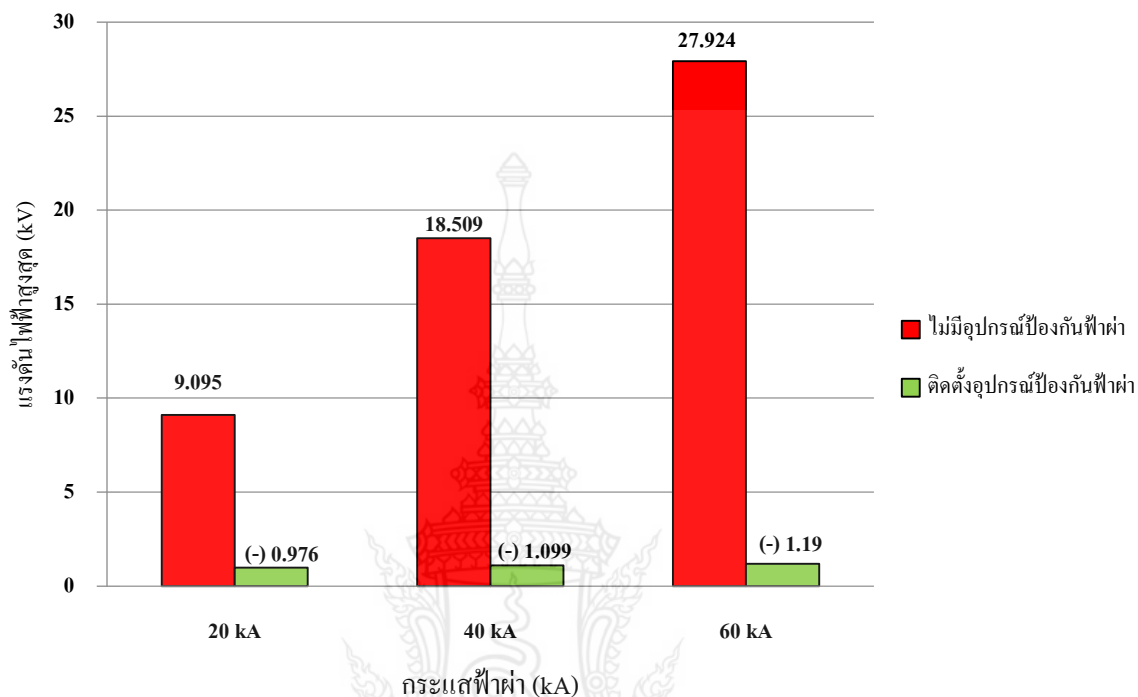
ฐ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.74 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.74 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 0.005 kA 0.023 kA และ 0.043 kA ตามลำดับ

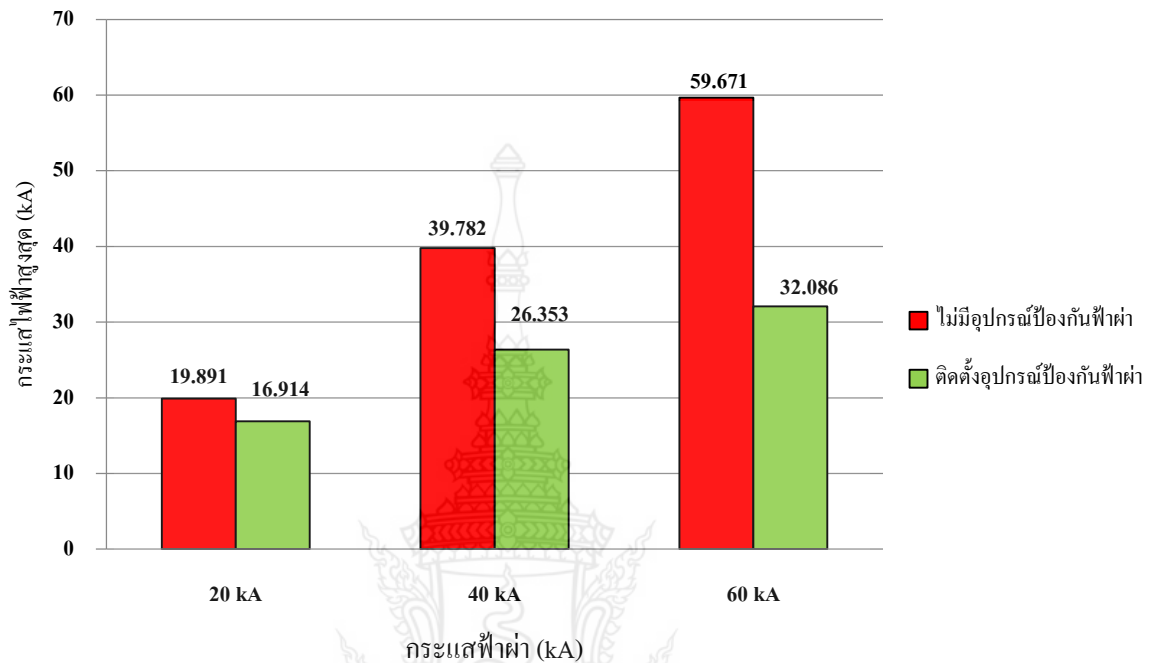
ท) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.75 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.75 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 8.119 kV 17.41 kV และ 26.734 kV ตามลำดับ

ค) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.76 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำแรกด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.76 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 2.977 kA 13.429 kA และ 27.585 kA ตามลำดับ

#### 4.1.3 กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมา (0.25/100 $\mu$ s) ด้าน DC

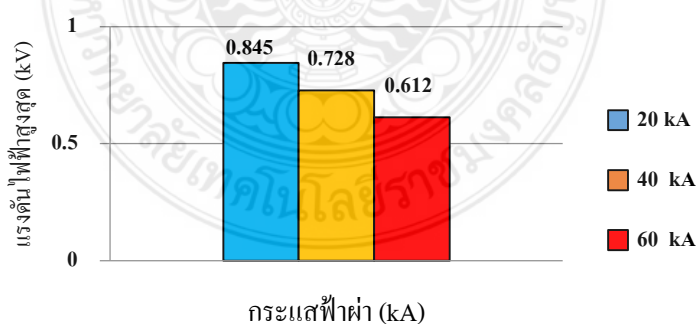
##### 4.1.3.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{\text{inject}}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)
20	0.845	-0.751	2.622	-6.416
40	0.728	-1.359	5.048	-12.814
60	0.612	-1.846	7.473	-19.212

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าล่าต่อมาที่รูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

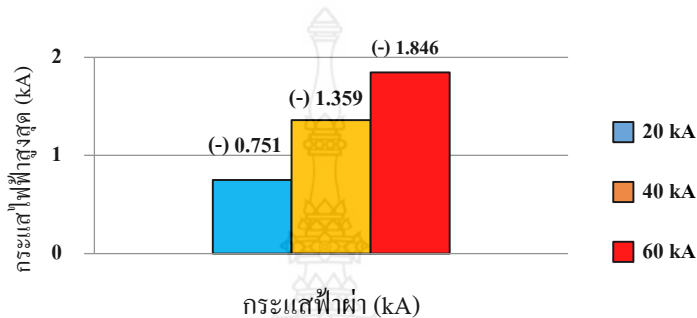
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.77 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.77 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าลดลง เท่ากับ 0.85 kV 0.728 kV และ 0.612 kV ตามลำดับ

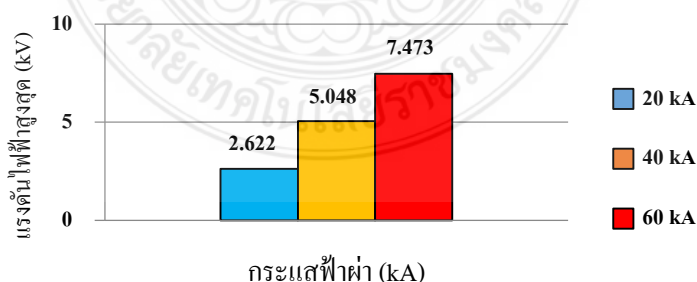
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



**รูปที่ 4.78** กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.78 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.751 kA 1.359 kA และ 1.846 kA ตามลำดับ

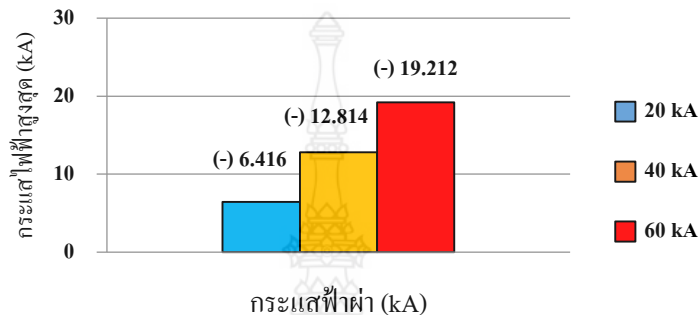
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



**รูปที่ 4.79** กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.79 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ 2.622 kV 5.048 kV และ 7.473 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.80 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.80 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 6.416 kA 12.814 kA และ 19.212 kA ตามลำดับ

#### 4.1.3.2 ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

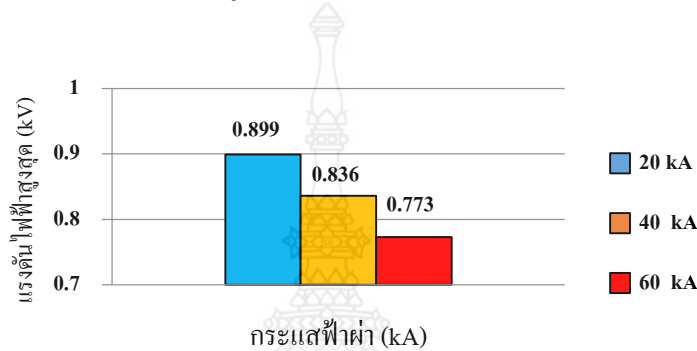
ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.899	-1.687	-0.199	-1.179
40	0.836	-3.408	-0.692	-1.993
60	0.773	-5.129	-0.737	-3.428



จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

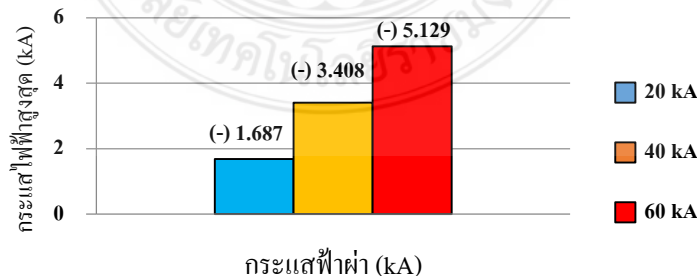
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



**รูปที่ 4.81** กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.81 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้าน DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมารูปคลื่นล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ซึ่งมีค่าลดลง เท่ากับ 0.899 kV 0.836 kV และ 0.773 kV ตามลำดับ

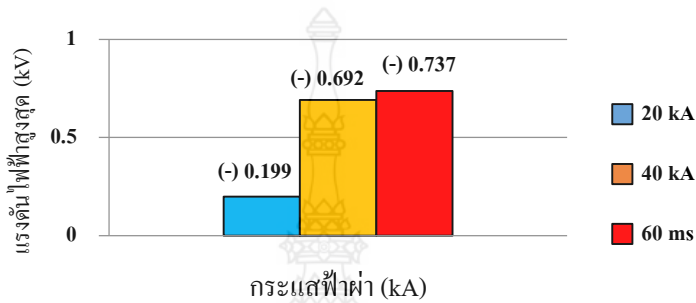
ข) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



**รูปที่ 4.82** กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงล่าต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.82 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำดับต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -1.687 kA -3.408 kA และ -5.129 kA ตามลำดับ

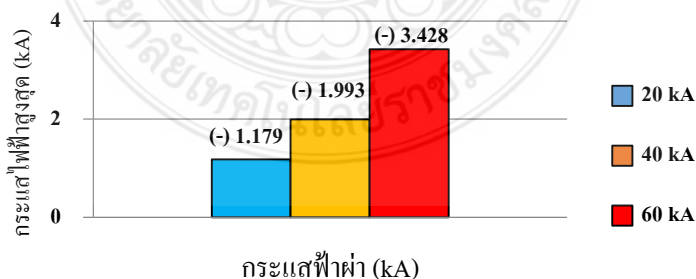
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.83 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำดับต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.83 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำดับต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.99 kV -0.692 kV และ -0.737 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.84 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำดับต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.84 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิคกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -1.179 kA -1.993 kA และ -3.428 kA ตามลำดับ

#### 4.1.4 กรณีฟ้าผ่าลำต่อมา (0.25/100 $\mu$ s) ด้าน AC

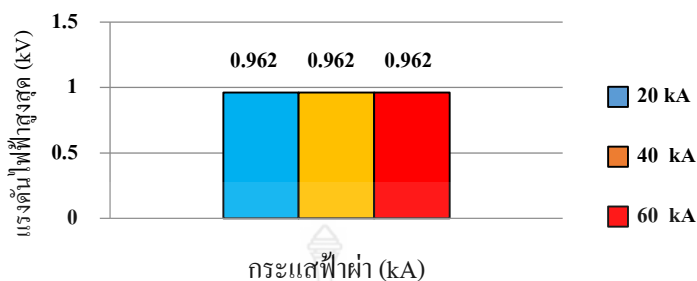
##### 4.1.4.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.962	0.018	-7.688	19.992
40	0.962	0.032	-15.141	39.982
60	0.962	0.046	-22.595	59.974

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำต่อมาที่รูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ค่าพิคกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

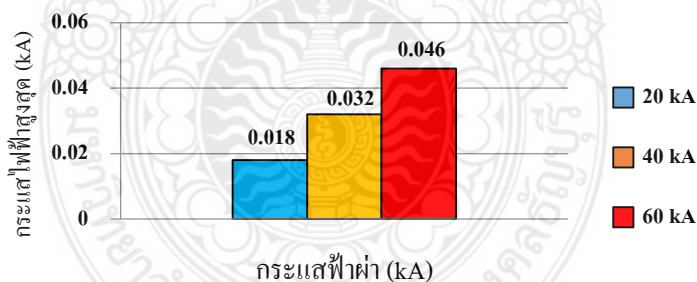
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.85 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.85 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.962 kV

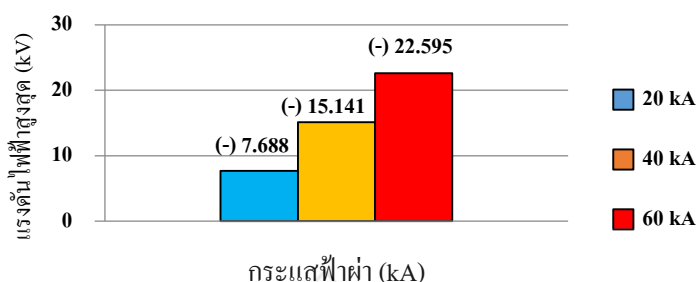
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสไฟฟ้า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.86 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.86 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.018 kA 0.032 kA และ 0.046 kA ตามลำดับ

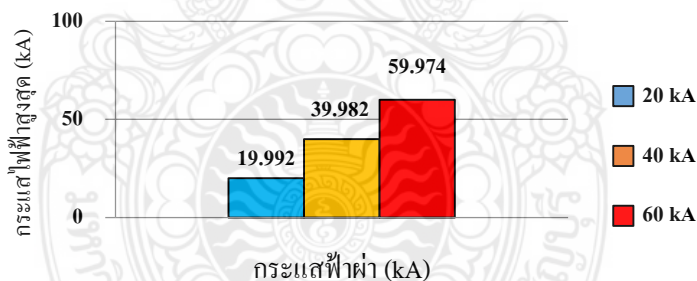
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.87 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.87 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ -7.688 kV -15.141 kV และ -22.595 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.88 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.88 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 19.992 kA 39.982 kA และ 59.974 kA ตามลำดับ

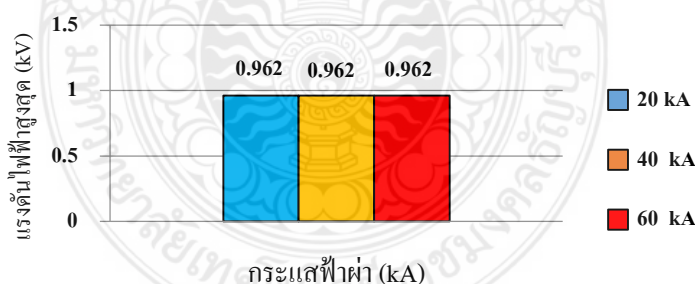
#### 4.1.4.2 ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่า  
ลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.962	0.017	-0.962	19.992
40	0.962	0.017	-1.084	39.982
60	0.962	0.017	-1.178	59.973

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของฟ้าผ่าลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA

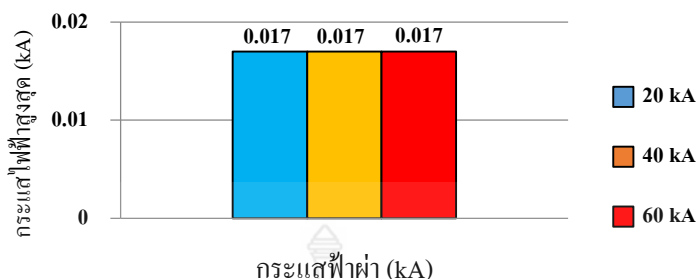


รูปที่ 4.89 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100 ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.89 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันฟ้าผ่าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่นที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.962 kV



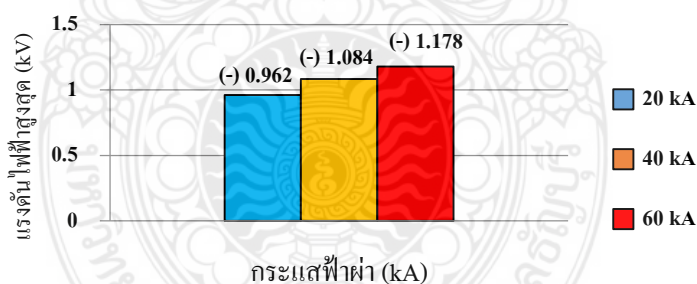
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.90 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.90 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.017 kA

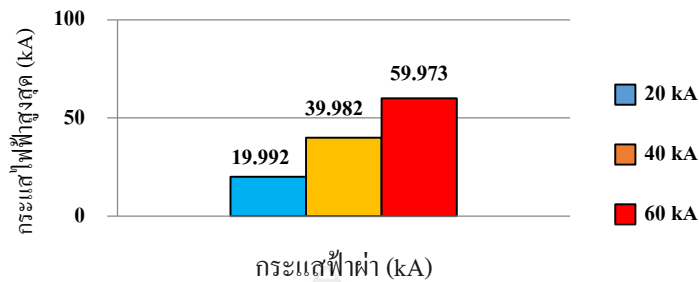
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.91 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.91 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่า ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.962 kV -1.084 kV และ -1.178 kV ตามลำดับ

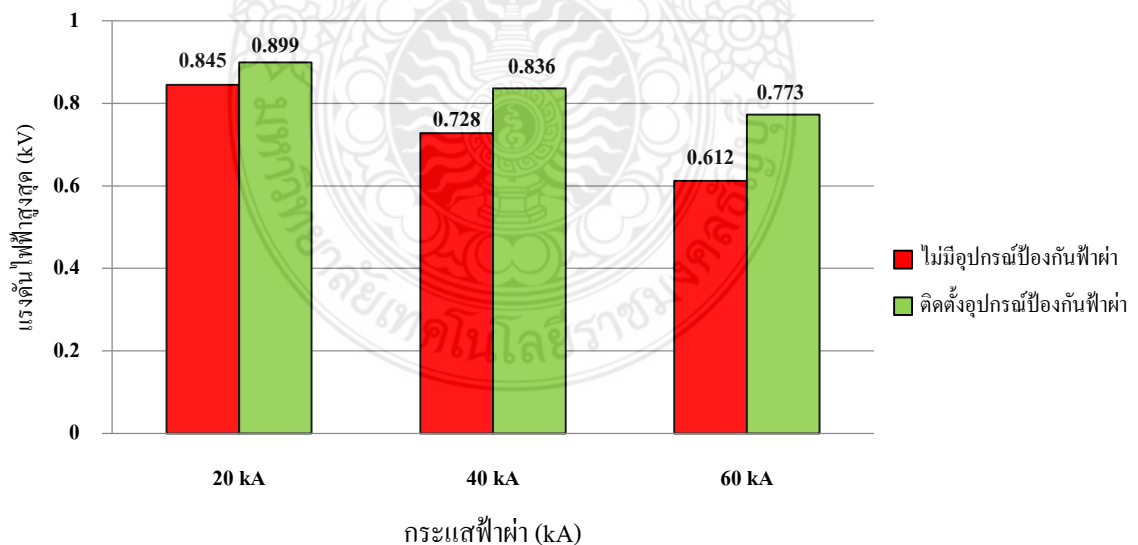
ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.92 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.92 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมาที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 19.992 kA 39.982 kA และ 59.973 kA ตามลำดับ

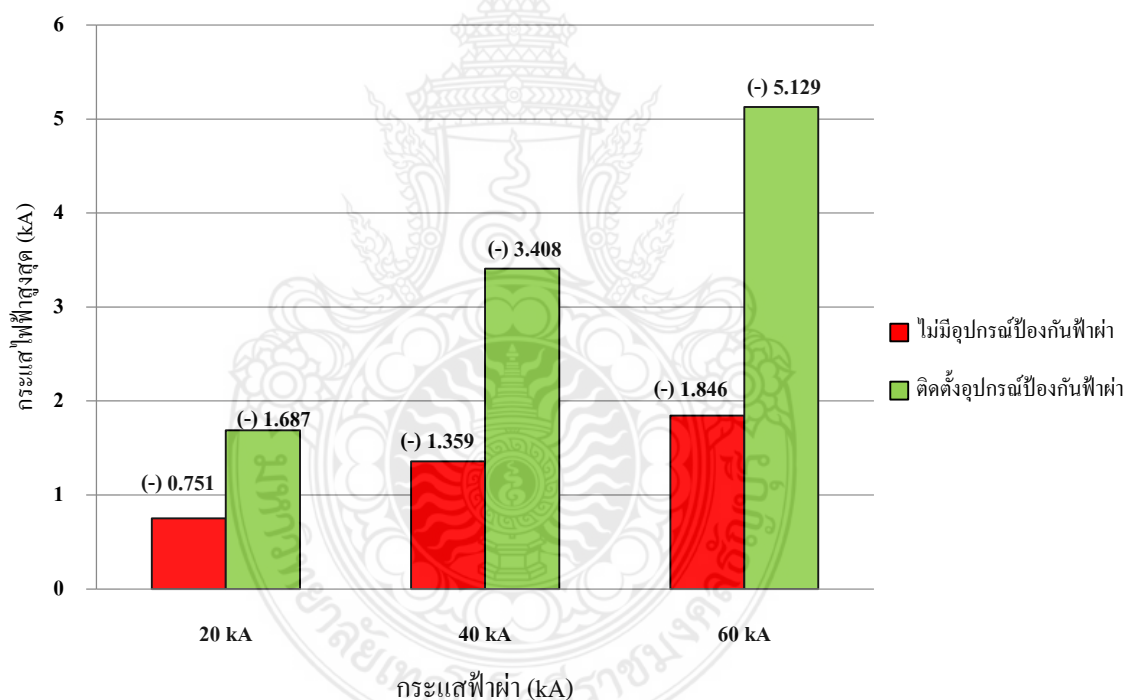
จ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.93 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าลำต่อมาด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.93 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.054 kV 0.108 kV และ 0.161 kV ตามลำดับ ซึ่งมีผลเนื่องจากการรักษาสภาพแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์คาปาซิเตอร์ขนาด 10,000  $\mu\text{F}$  ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ

จ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

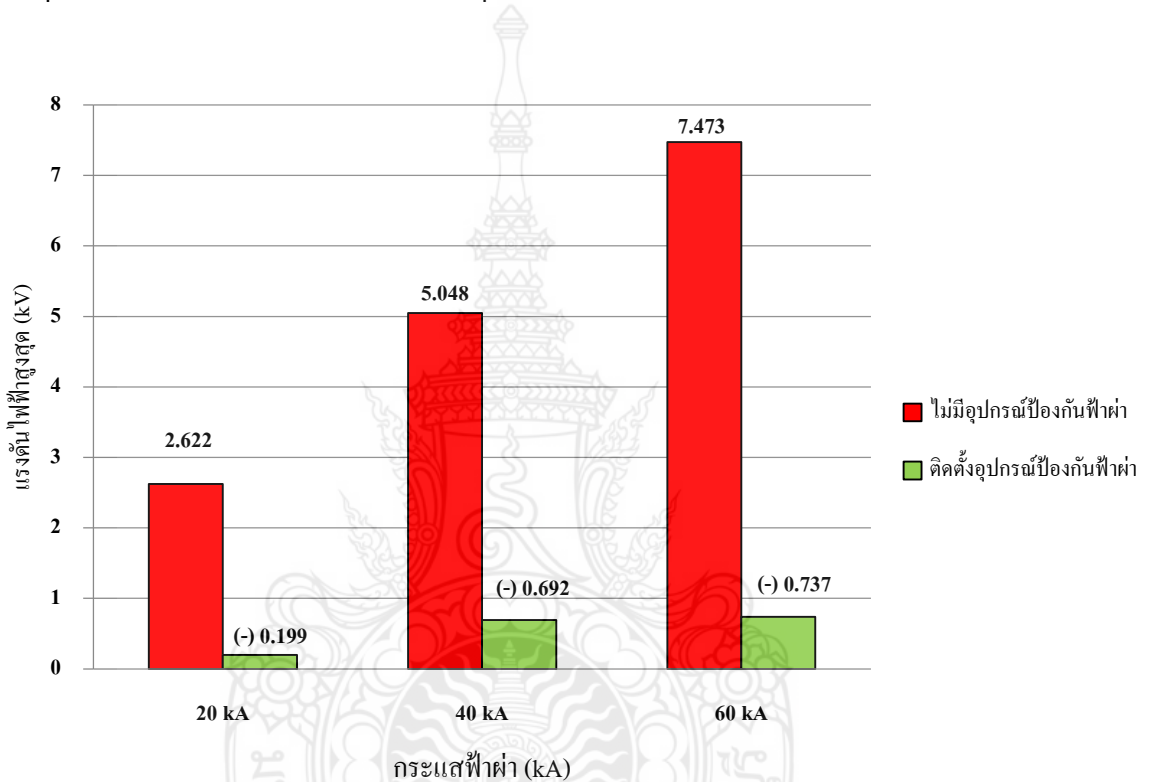


รูปที่ 4.94 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC กรณีฟ้าผ่าลงมาด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.94 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้ง

อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.936 kA 2.049 kA และ 3.283 kA ตามลำดับ

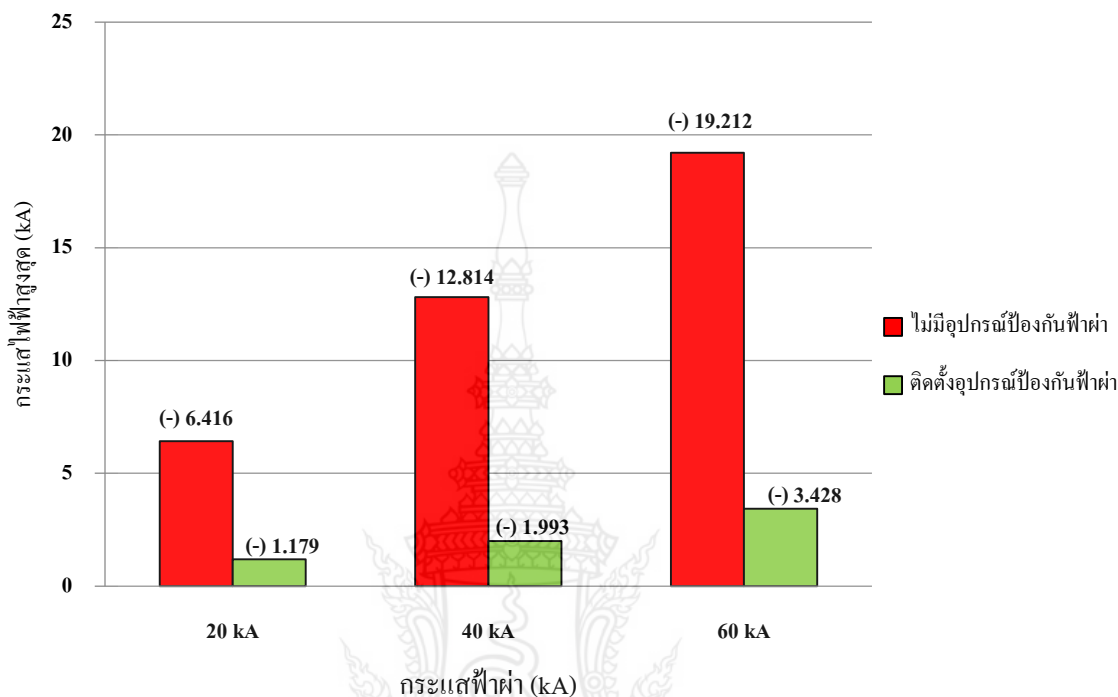
ข) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.95 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.95 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 2.423 kV 4.356 kV และ 6.736 kV ตามลำดับ

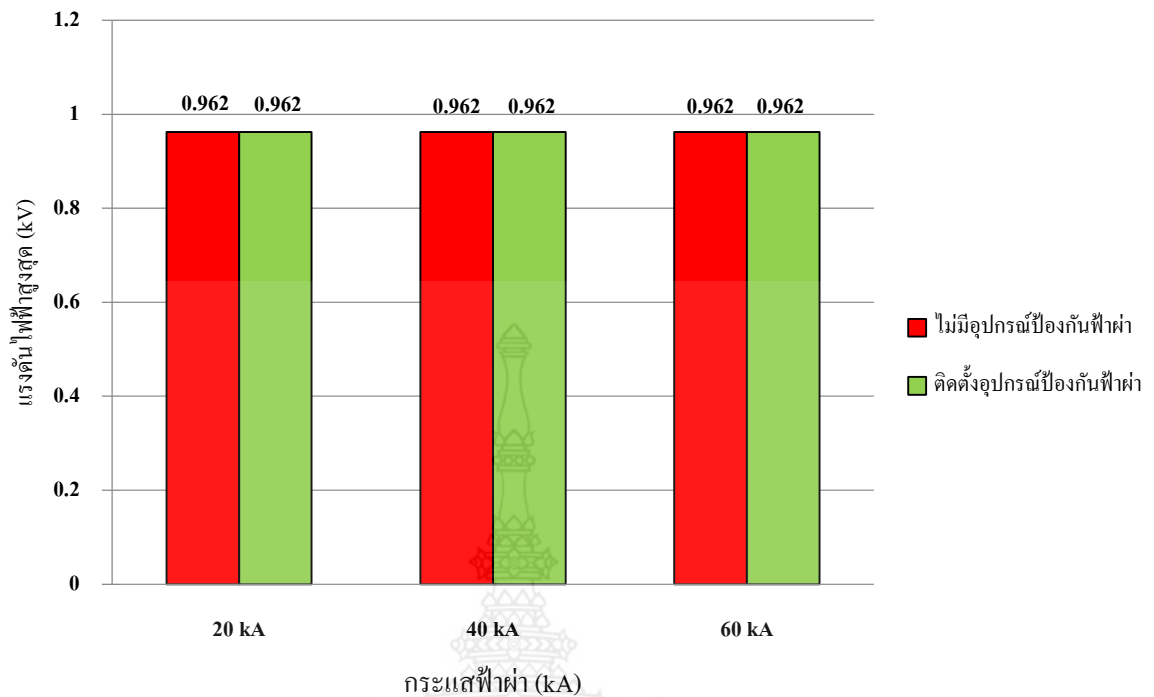
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.96 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าลุ่มาด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.96 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิักัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 5.237 kA 10.821 kA และ 15.784 kA ตามลำดับ

ฅ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

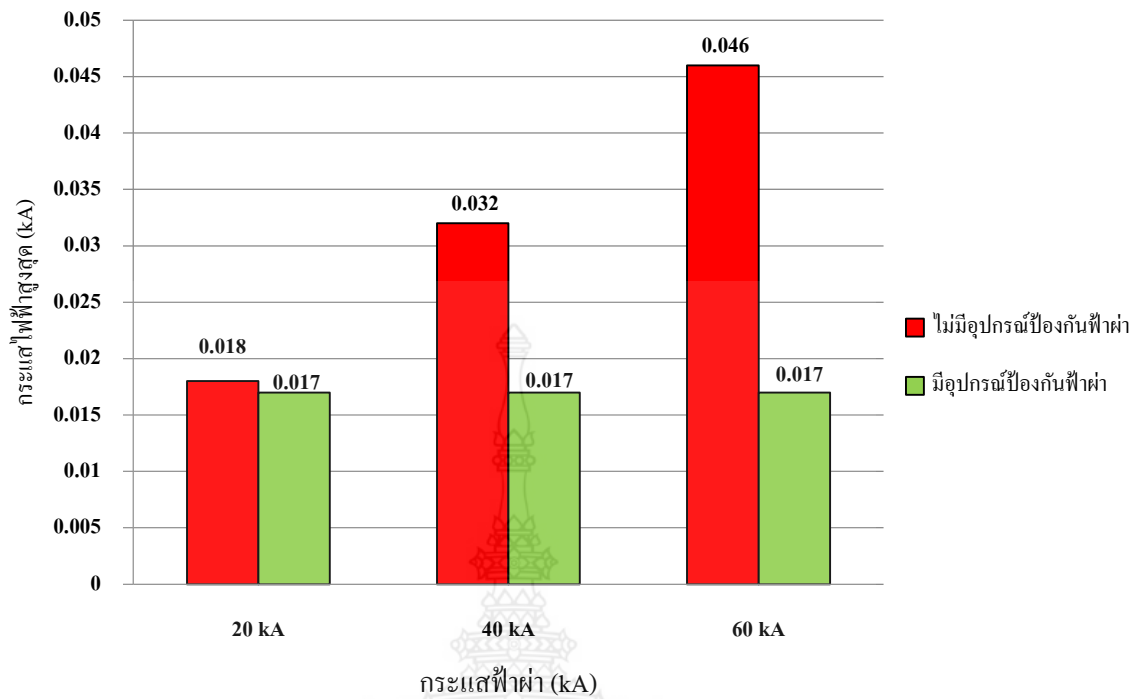


รูปที่ 4.97 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.97 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าเท่าเดิม เท่ากับ 0.962 kV

ญ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

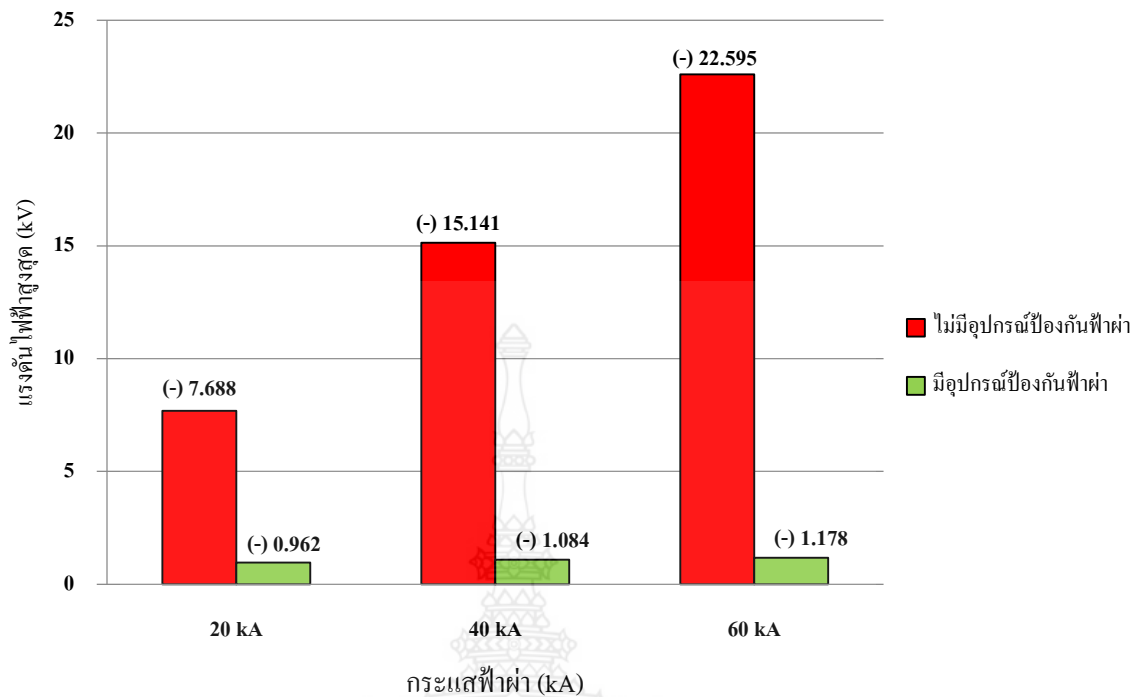




รูปที่ 4.98 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ระบบ DC กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.98 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 0.001 kA 0.015 kA และ 0.029 kA ตามลำดับ

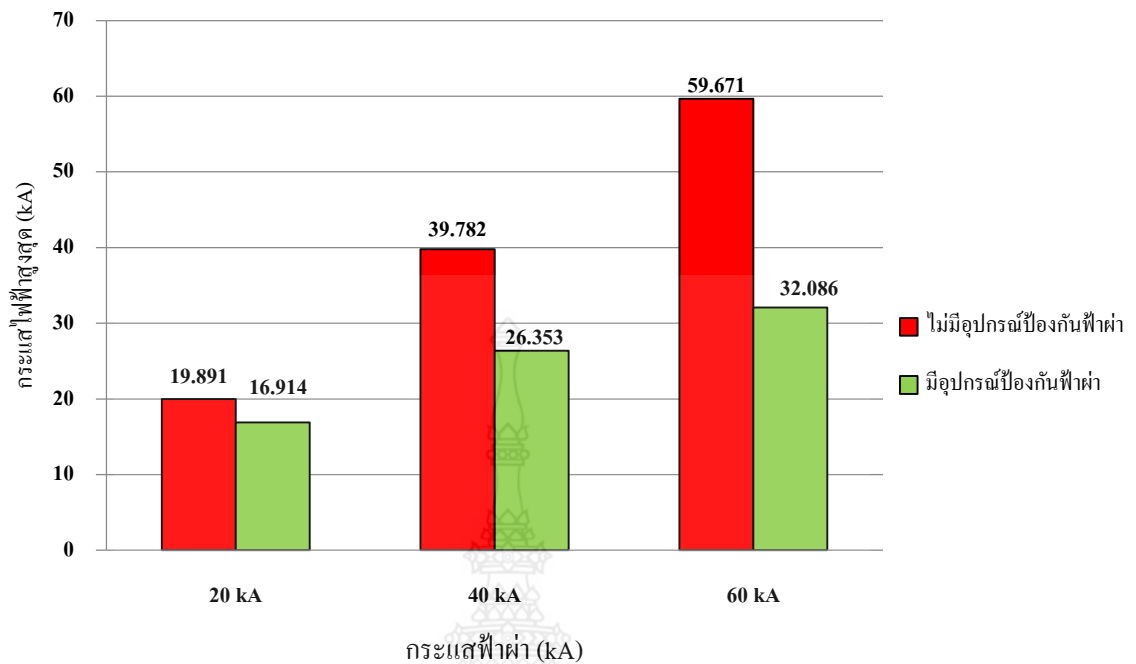
ฎ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



**รูปที่ 4.99** กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.99 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 6.726 kV 14.057 kV และ 21.417 kV ตามลำดับ

ฎ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.100 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.100 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 2.977 kA 13.429 kA และ 27.585 kA ตามลำดับ

## 4.2 กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Strike)

### 4.2.1 กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (80/20 $\mu$ s) ด้าน DC

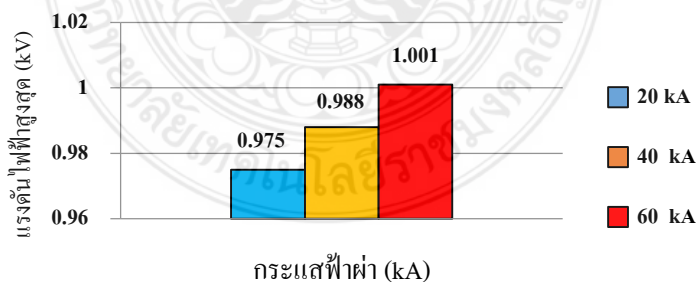
#### 4.2.1.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{\text{inject}}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)	$V_{\text{max}}$ (kV)	$I_{\text{max}}$ (kA)
20	0.975	0.016	-0.834	1.049
40	0.988	0.016	-1.341	2.079
60	1.001	0.016	-1.847	3.109

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางอ้อมที่รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

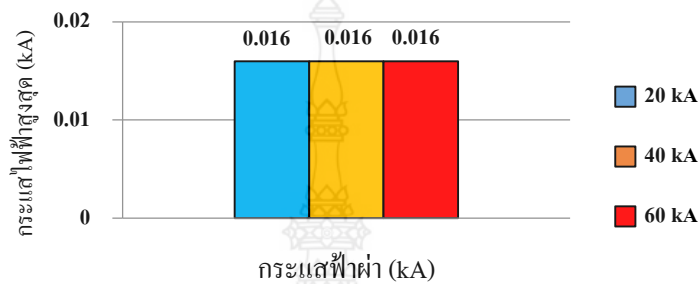
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.101 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.101 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.975 kV 0.988 kV และ 1.001 kV ตามลำดับ

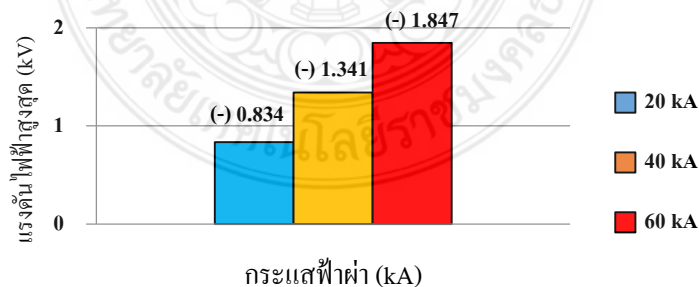
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.102 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.102 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.016 kV

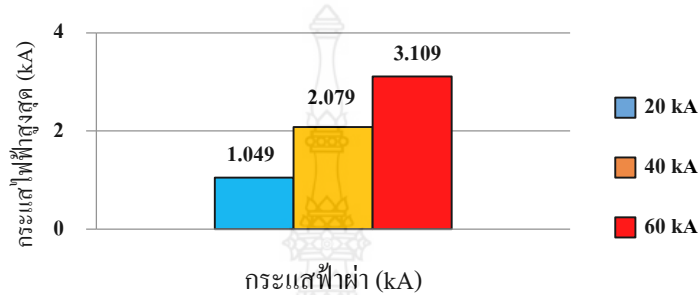
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.103 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.103 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.834 kV -1.341 kV และ -1.847 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิคัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.104 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.104 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิคัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ 6.416 kA 12.814 kA และ 19.212 kA ตามลำดับ

#### 4.2.1.2 ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

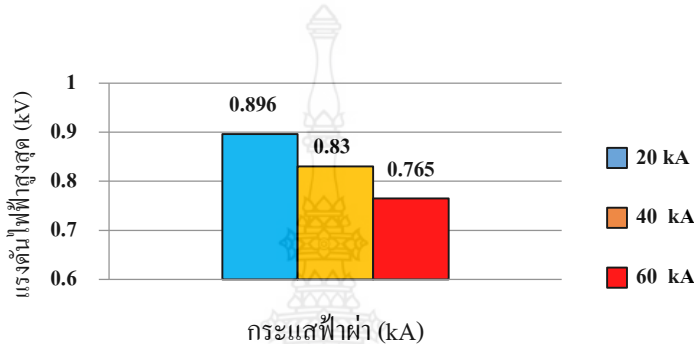
ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.896	-1.768	-0.592	-1.268
40	0.830	-3.794	-0.706	-2.546
60	0.765	-6.153	-0.755	-3.951



จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางอ้อมที่รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

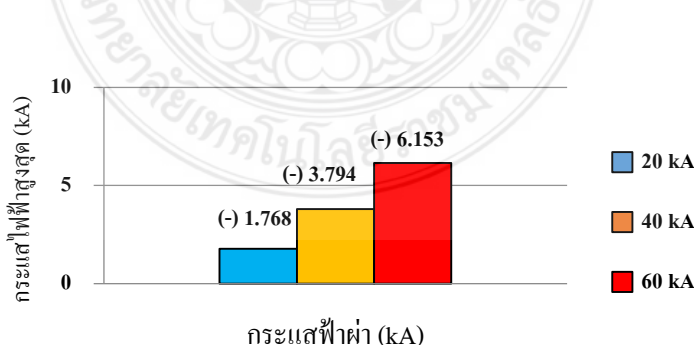
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.105 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.105 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้าน DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าลดลง เท่ากับ 0.899 kV 0.830 kV และ 0.765 kV ตามลำดับ

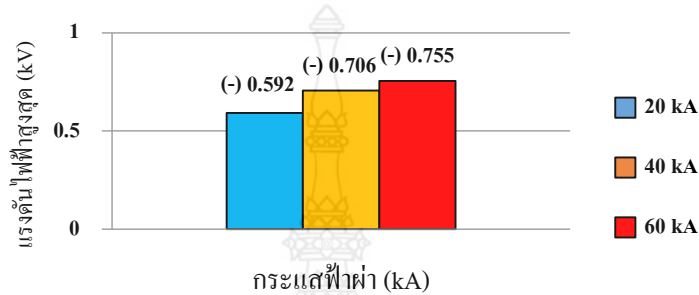
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.106 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.106 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -1.768 kA -3.794 kA และ -6.153 kA ตามลำดับ

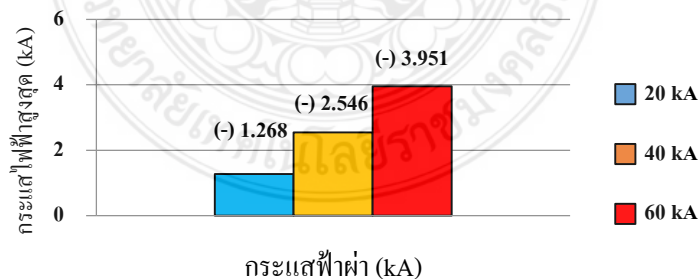
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.107 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.107 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.592 kV -0.706 kV และ -0.755 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.108 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.108 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่ากระแสเพิ่มขึ้น เท่ากับ -1.268 kA -2.546 kA และ -3.951 kA ตามลำดับ

#### 4.2.2 กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (80/20 $\mu$ s) ด้าน AC

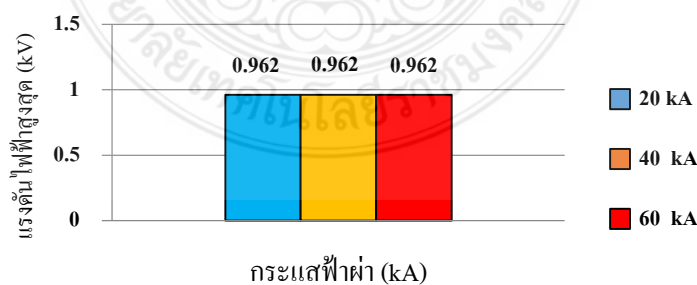
##### 4.2.2.1 ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.962	0.016	-1.855	19.947
40	0.962	0.016	-3.382	39.893
60	0.962	0.016	-4.909	59.840

จากตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางอ้อมที่รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

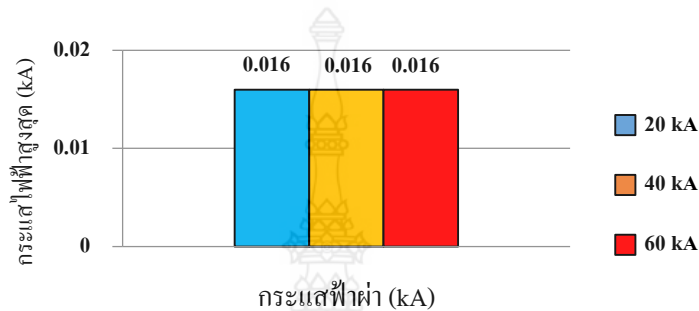
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.109 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.109 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.962 kV

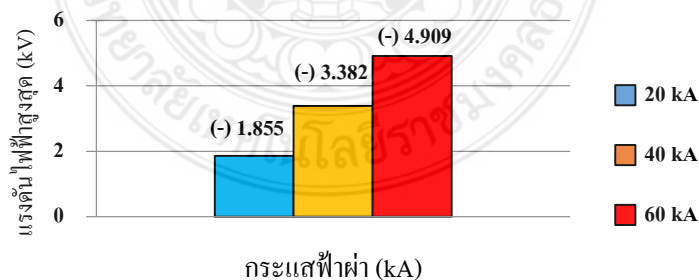
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.110 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.110 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.016 kA

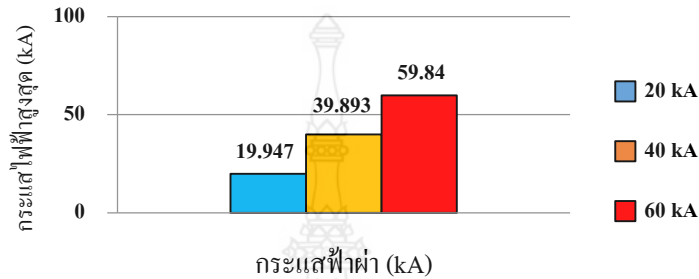
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.111 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.111 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ -1.855 kV -3.382 kV และ -4.409 kV ตามลำดับ

ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.112 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.112 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 19.992 kA 39.982 kA และ 59.974 kA ตามลำดับ

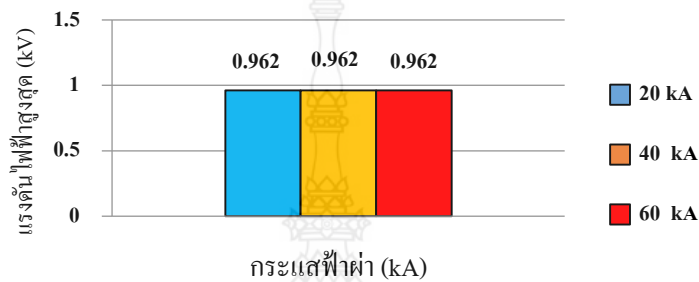
#### 4.2.2.2 คัดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

$I_{inject}$ (kA)	DC		AC	
	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)	$V_{max}$ (kV)	$I_{max}$ (kA)
20	0.962	0.016	-0.954	17.912
40	0.962	0.016	-1.089	29.492
60	0.962	0.016	-1.186	38.229

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบไฟฟ้าด้าน DC และ AC กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางอ้อมที่รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับ

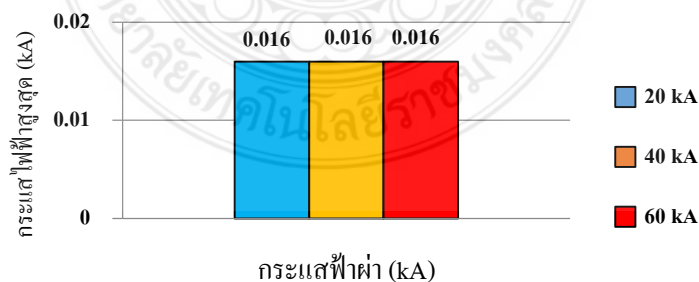
ก) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.113 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.113 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้าน DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.962 kV

ข) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA

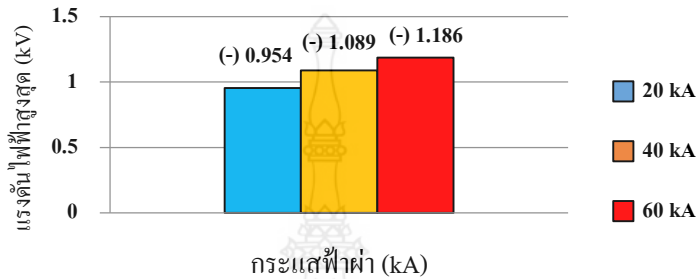


รูปที่ 4.114 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



จากรูปที่ 4.114 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.016 kA

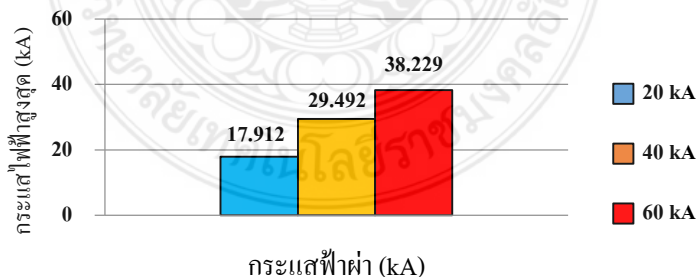
ค) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.115 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม รูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.115 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ -0.954 kV -1.089 kV และ -1.186 kV ตามลำดับ

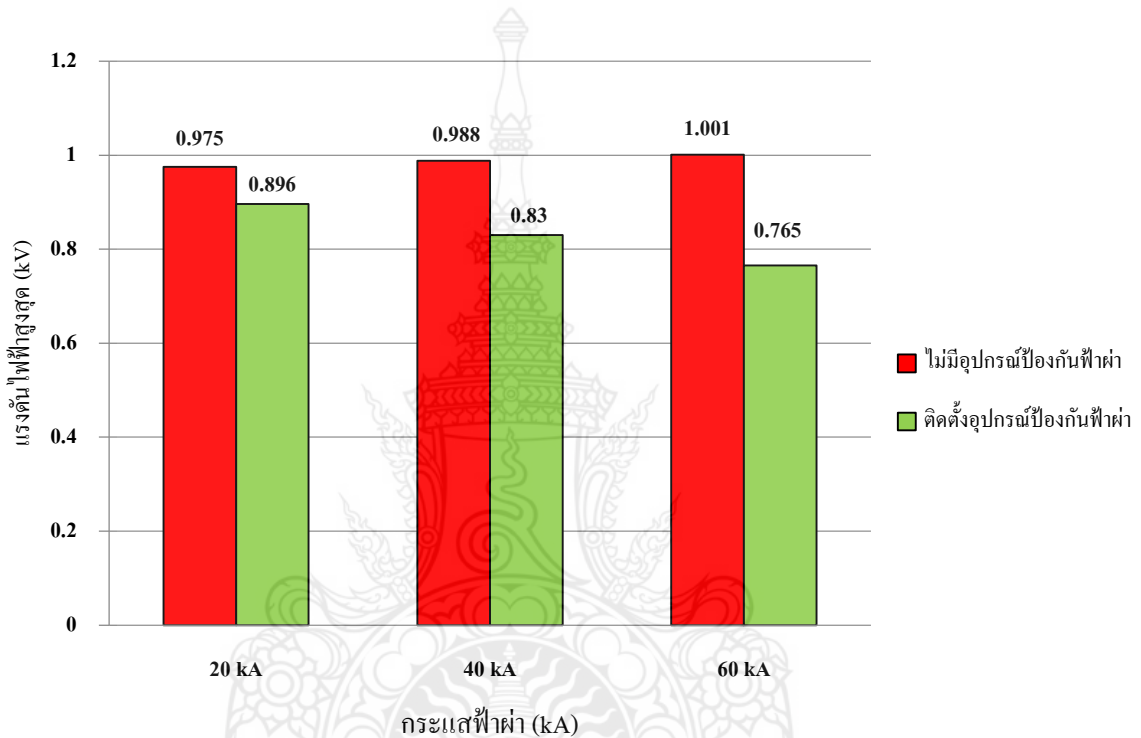
ง) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่า 20 kA 40 kA และ 60 kA



รูปที่ 4.116 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20  $\mu$ s ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.116 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า กรณีฟ้าผ่าทางอ้อมที่ค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 17.912 kA 29.492 kA และ 38.229 kA ตามลำดับ

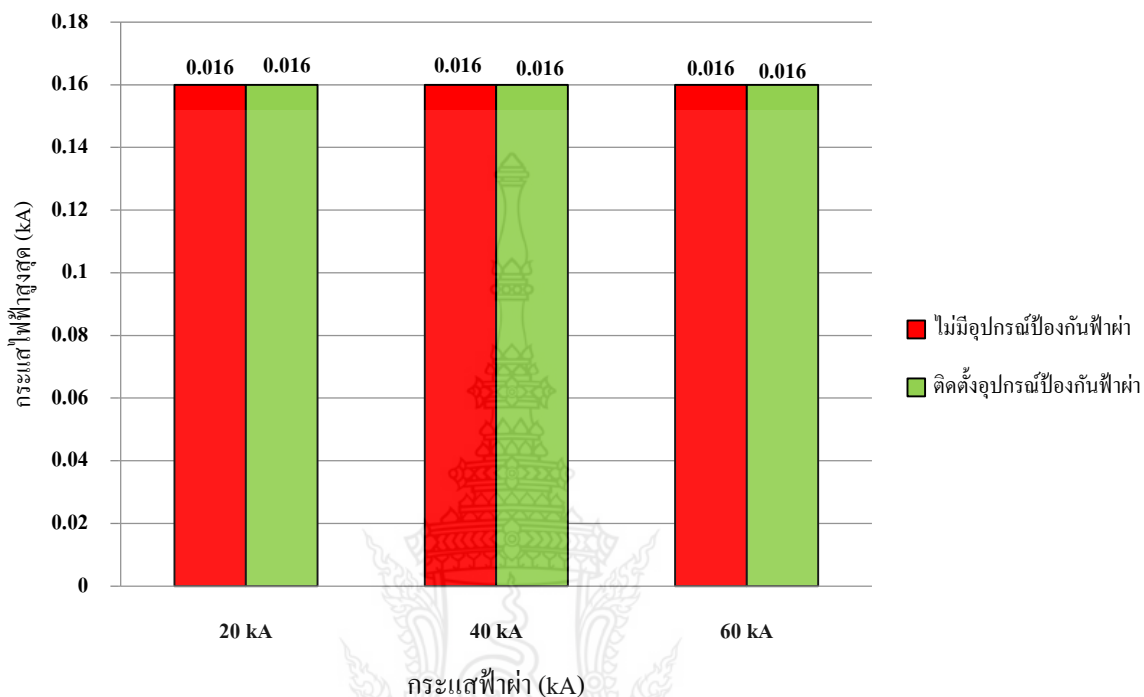
จ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.117 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.117 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันกระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 0.079 kV 0.158 kV และ 0.236 kV ตามลำดับ

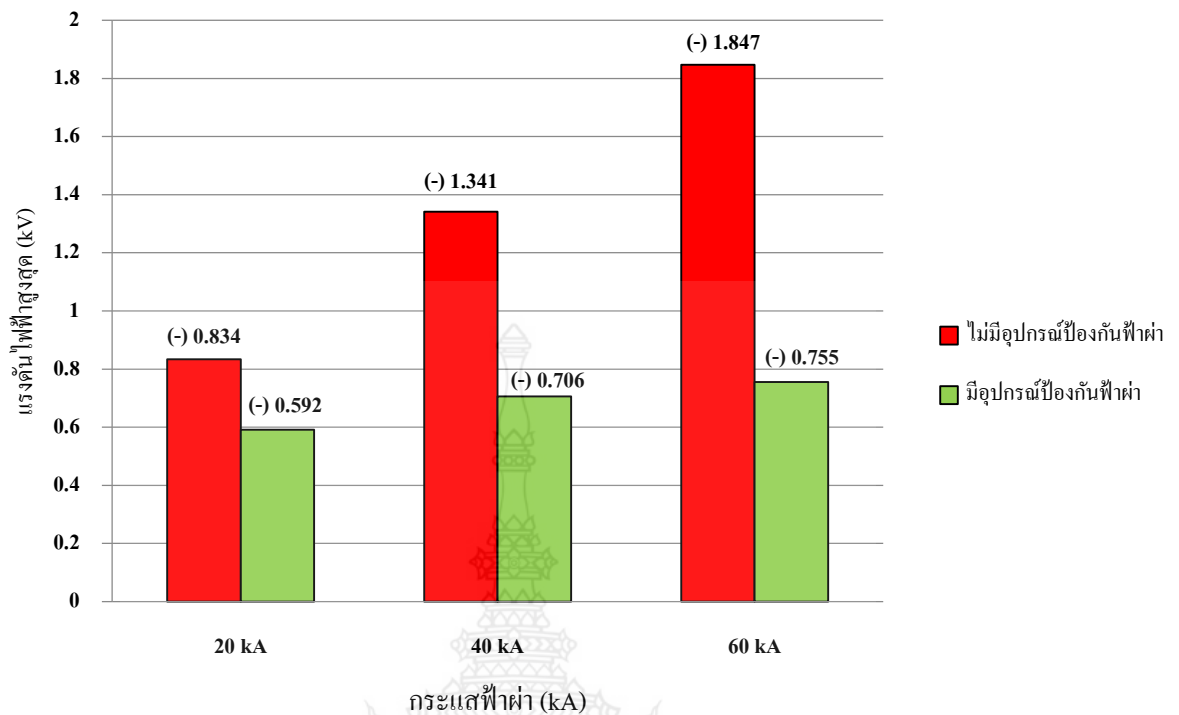
ฉ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.118 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.118 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิักัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าเท่าเดิม เท่ากับ 0.016 kA

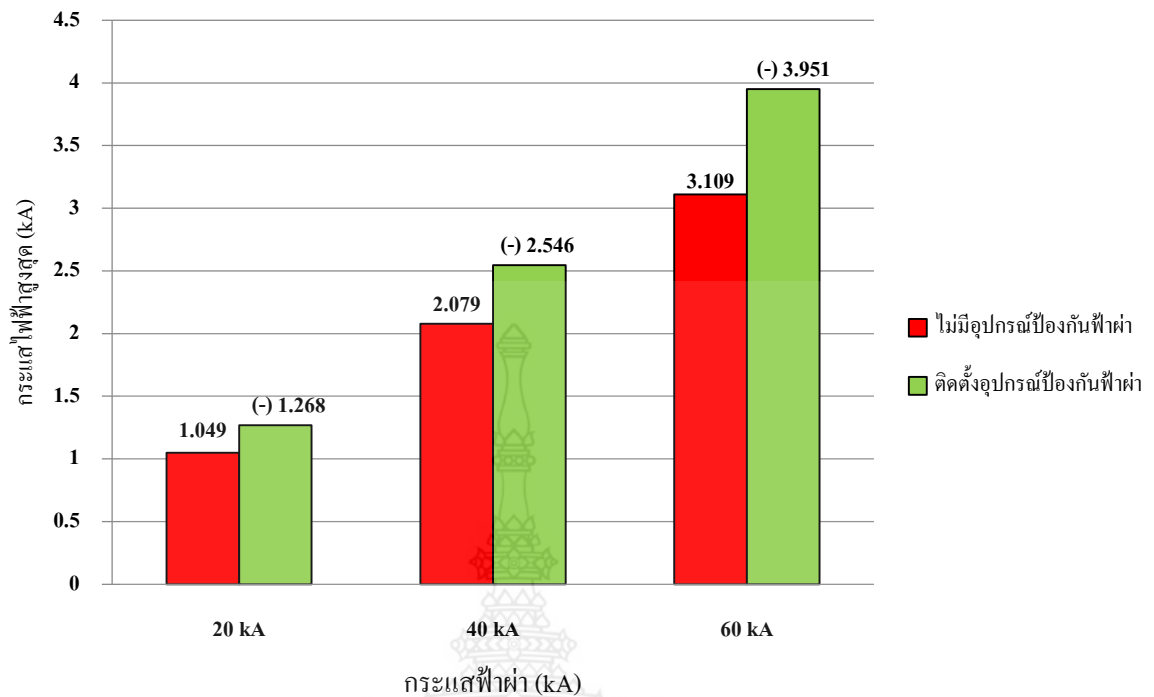
ช) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.119 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.119 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิักัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าลดลง เท่ากับ 0.242 kV 0.635 kV และ 1.092 kV ตามลำดับ

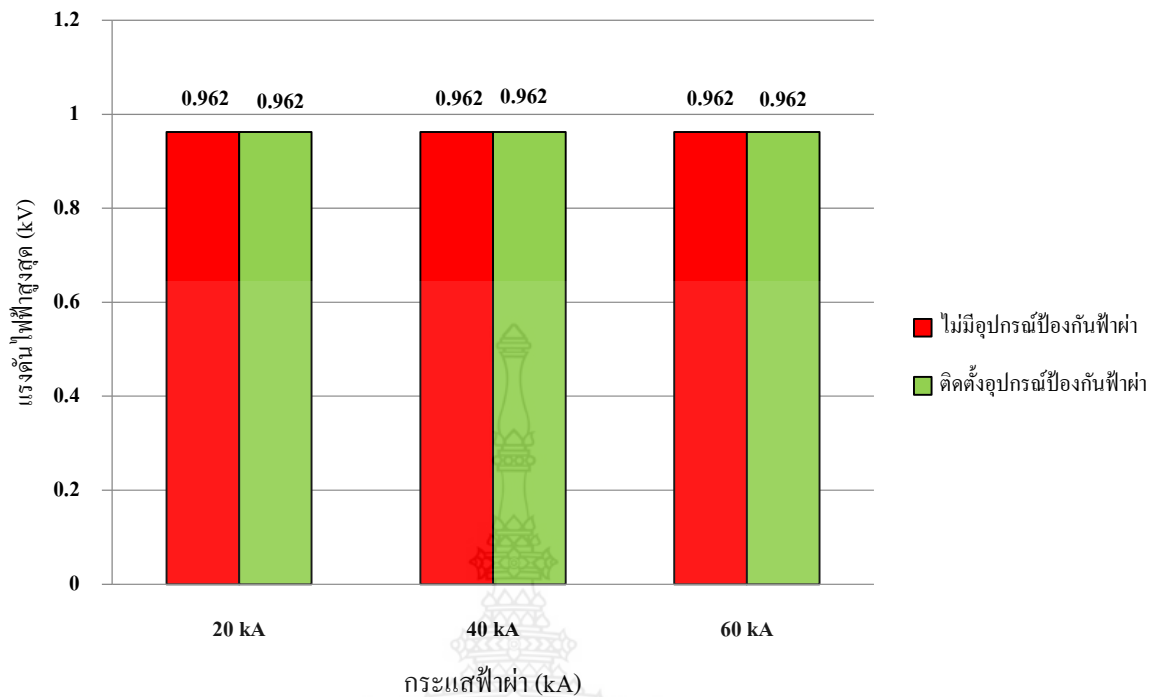
ข) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.120 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน DC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.120 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน DC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.219 kA 0.467 kA และ 0.842 kA ตามลำดับ

ณ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

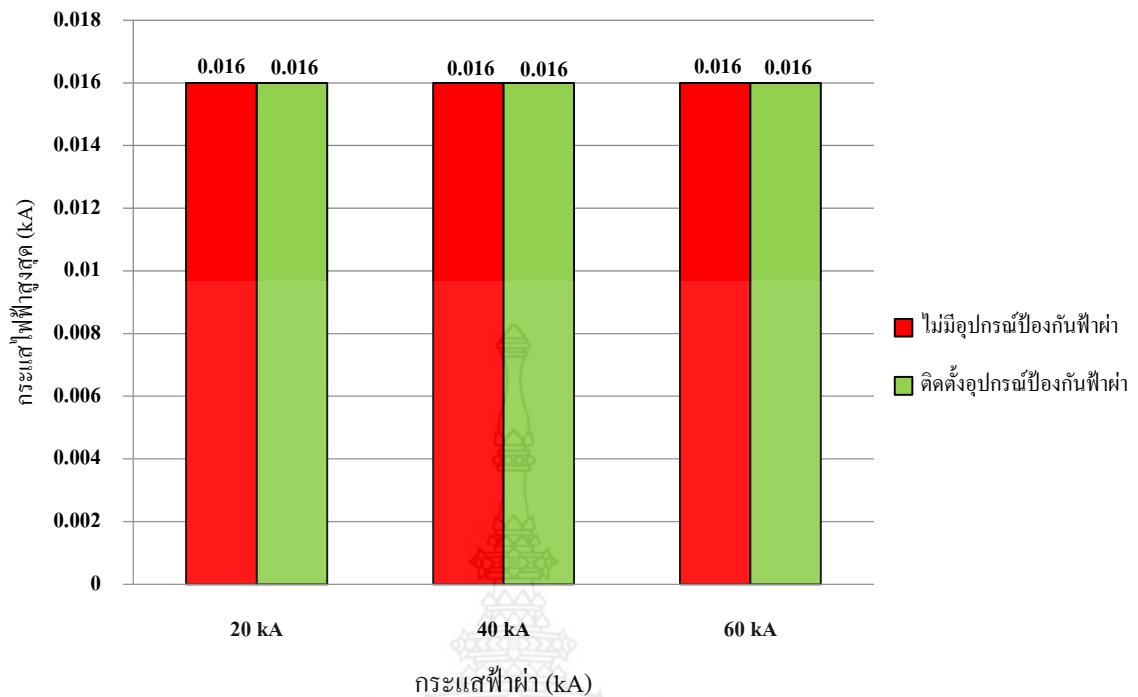


รูปที่ 4.121 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.121 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิกัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าเท่าเดิม เท่ากับ 0.962 kV

ญ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

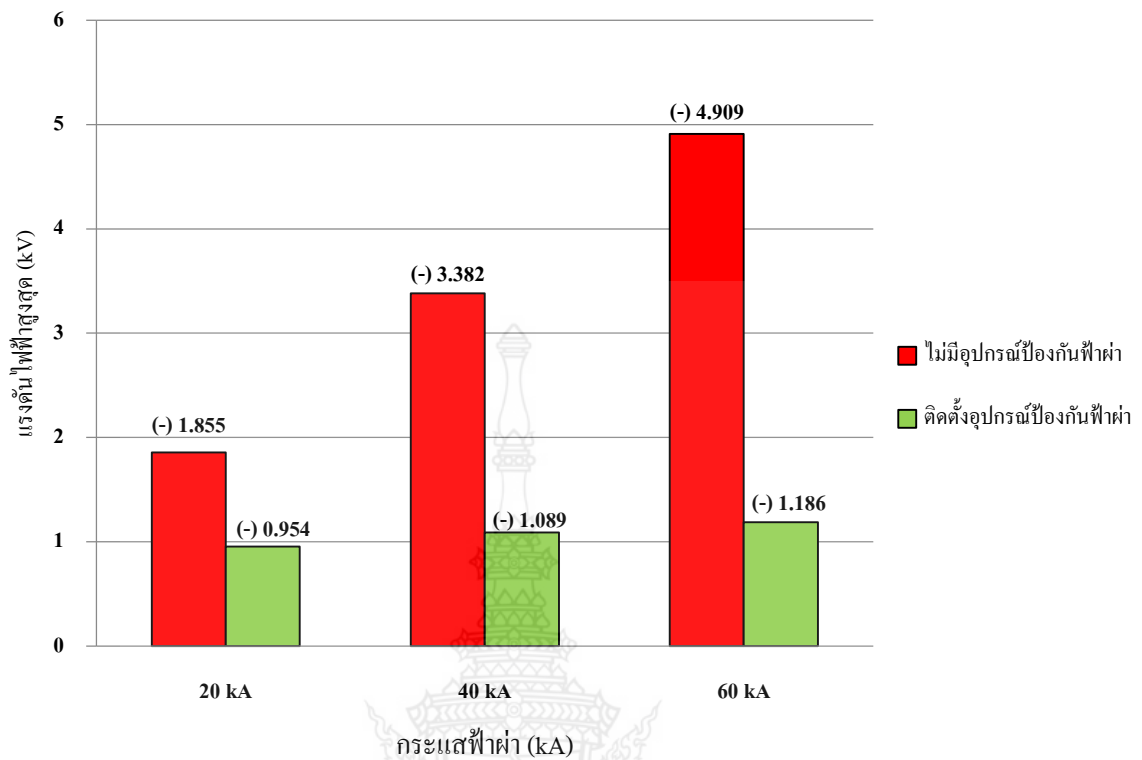




รูปที่ 4.122 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ DC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.122 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟ เฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าเท่าเดิม เท่ากับ 0.016 kA

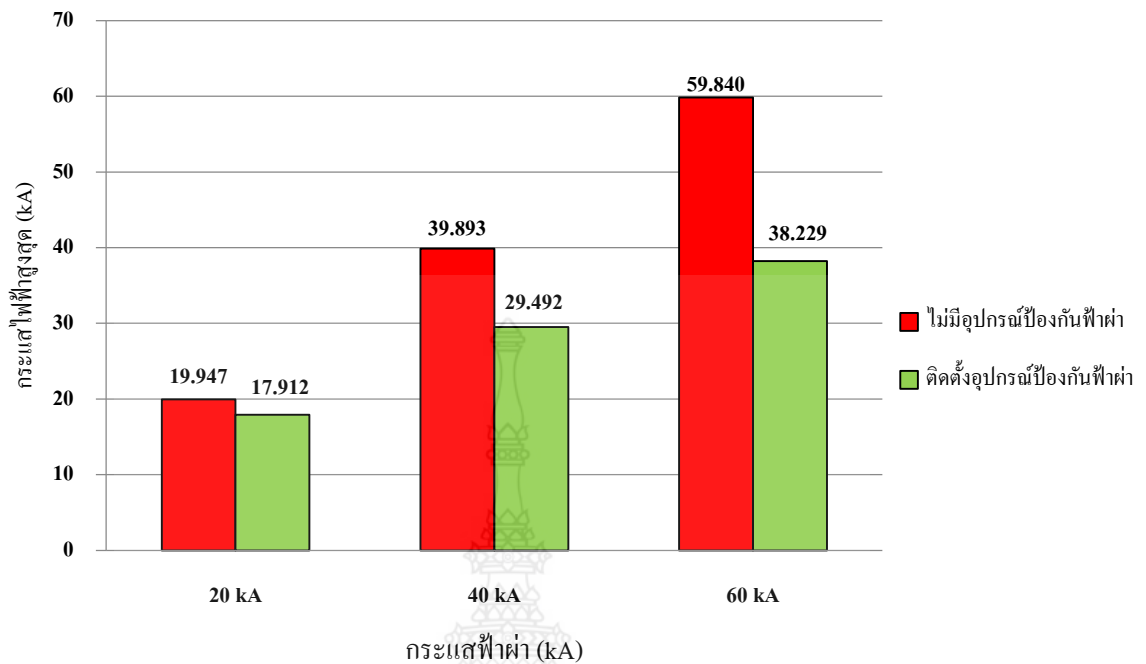
ฎ) เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.123 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.123 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลังมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 0.901 kV 2.293 kV และ 3.723 kV ตามลำดับ

ฎ) เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC ในกรณีฟ้าผ่าลงสายไฟด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4.124 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระบบ AC กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม ด้าน AC ของระบบที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.124 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ของเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงสายไฟเฟส B ด้าน AC ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่พิคัดป้องกันฟ้าผ่าขนาด 40 kA โดยผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC ภายหลัง มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีค่าลดลง เท่ากับ 2.035 kA 10.401 kA และ 21.611 kA ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่มีขนาดอัตรากำลังผลิตไม่เกิน 10 MW โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD Version 4.6 พบว่า ในการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของลำฟ้าผ่าลำแรกที่รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ที่ค่ากระแสฟ้าผ่า ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ตามลำดับกรณีของฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟด้าน DC เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าและระบบที่มีติดตั้งอุปกรณ์ฟ้าผ่าโดยการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ขนาดพิสัยการป้องกันกระแสฟ้าผ่า 40 kA โดยติดตั้งในระบบ 1 เฟส จำนวน 7 ตัว และในระบบ 3 เฟส 1 ตัว เมื่อพิจารณาถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC พบว่าค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากในขณะที่เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าคาปาซิเตอร์ขนาด 10,000  $\mu$ F ที่ติดตั้งอยู่ในระบบมีการรักษาสภาพของแรงดันไฟฟ้า เมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบมีค่าลดลง 2.830 kV 5.871 kV และ 8.912 kV หรือคิดเป็น 12.69% 6.56% และ 4.41% ตามลำดับเมื่อพิจารณากรณีของฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟ เฟส B ด้าน AC พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC มีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง และในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC มีค่าลดลง 8.119 kV 17.41 kV และ 26.734 kV หรือคิดเป็น 10.73% 5.94% และ 4.26% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงของลำฟ้าผ่าลำต่อมาที่รูปคลื่น 0.25/100  $\mu$ s กรณีฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟด้าน DC พบว่า ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากในขณะที่เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าคาปาซิเตอร์ขนาด 10,000  $\mu$ F ที่ติดตั้งอยู่ในระบบมีการรักษาสภาพของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบมีค่าลดลง 2.423 kV 4.356 kV และ 6.736 kV หรือคิดเป็น 7.59% 13.71% และ 9.86% ตามลำดับ เมื่อพิจารณากรณีของฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟ เฟส B ด้าน AC พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC มีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง และในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC มีค่าลดลง 6.726 kV 14.057 kV และ 21.417 kV หรือคิดเป็น 12.51% 7.16% และ 5.21%ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางอ้อมที่รูปคลื่น 80/20  $\mu$ s กรณีฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟด้าน DC พบว่า ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบมีค่าลดลง 0.242 kV 0.635 kV และ 1.092 kV หรือคิดเป็น 70.98% 52.65% และ 40.88% ตามลำดับ เมื่อพิจารณากรณีของฟ้าผ่าลงบริเวณสายไฟ เฟส B ด้าน AC พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ DC มีค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงและในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบ AC มีค่าลดลง 0.901 kV 2.293 kV และ 3.723 kV หรือคิดเป็น 51.43% 32.20% และ 24.16% ตามลำดับ จากผลการทดลองจึงสรุปว่า อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ที่ออกแบบและมานำติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์นั้นสามารถช่วยลดผลกระทบจากแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าได้ แต่เนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าลงที่อุปกรณ์โดยตรงนั้นจะทำให้แรงดันเสิร์จซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบกระจายไปในทุกทิศทางตามแนวสายไฟวิ่งเข้าสู่ระบบเป็นผลให้อุปกรณ์ในบริเวณตำแหน่งที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเกิดการชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงควรพิจารณาร่วมกับการติดตั้งเสาต่อฟ้าในตำแหน่งที่เหมาะสมด้วย เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดฟ้าผ่าลงอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

การสร้างแบบจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการสร้างเหตุการณ์และแบบจำลองของเหตุการณ์การฟ้าผ่าตามข้อจำกัดเฉพาะในกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ที่มีอัตรากำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW ซึ่งในการสร้างแบบจำลองนี้ใช้ต้นแบบโครงการมาจากบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขบริเวณจุดที่เกิดฟ้าผ่าลงนั้นได้กำหนดในส่วนอุปกรณ์ที่เป็นสายไฟฟ้าในด้าน DC และ AC เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตของการศึกษาในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในระบบทั้งในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด เป็นต้น สำหรับการกำหนดค่าพิกัดค่ากระแสฟ้าผ่า ขนาด 20 kA 40 kA และ 60 kA ในลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าแบบชั่วคราวได้อย่างอิงมาจากสถิติการเกิดฟ้าผ่าของประเทศไทยสำหรับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นศึกษาในส่วนของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) ซึ่งปัจจัยอื่นๆที่สำคัญ เช่น การวางระบบกราวด์ การวางตำแหน่งของล่อฟ้า หากมีการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้จะทำให้การวิจัยในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่ามีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ในปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีหลากหลายรูปแบบและหลากหลายขนาด ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราค่าการผลิต เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ทั้งประเภทของบ้านเรือนอยู่อาศัย หรือ ประเภทธุรกิจอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ดังนั้นในการที่พิจารณาออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงขอบเขตของระบบงานที่ทำการวิจัยรวมถึงความเหมาะสมของการเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้มีความปลอดภัยและลดความเสี่ยงหรือผลกระทบของฟ้าผ่าที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป





## บรรณานุกรม

- [1] กระทรวงพลังงาน. (2559). **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015)**. สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp>
- [2] วิสสุต อัสวภัทรสกุล. (2556). **ปัจจัยที่เป็นเหตุและผลของการรับรู้ความสามารถในตนเองของพนักงานระดับปฏิบัติการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ).**
- [3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561). **ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน)**. สืบค้นจาก <http://www.pea.co.th/Portals/0/Document/RegRenew.pdf>
- [4] Uclia Wang. (2013). **Meet Solar Grid Storage A Startup Mixing Batteries and Solar**, Retrieved from <https://gigaom.com/2013/10/04/meet-solar-grid-storage-a-startup-mixing-batteries-and-solar>
- [5] นาดยา คล้ายเรือง, วิชชุดา โสโพธิ์ และอรรด พะยอมหอม. (2553). การปรับปรุงสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 kV, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 48 (กุมภาพันธ์ 2553), 421-428
- [6] Mohd Hisanuddin Bin Zamharir. (2012). **Study on Lightning Protection for PV System.** (A report submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Electrical Engineering (Industrial Power), Universiti Teknikal Malaysia Melaka).
- [7] บุญเลิศ ไตรประดิษฐ์. (2555). **การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน.** (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [8] นวคุณ ไตรรัตนากิริย์. (2557). **การสร้างกระแสไฟฟ้าสำหรับการทดสอบหาแรงดันคงเหลือของกักเก็บแรงดันเกินฟ้าผ่าและแบบจำลองทางไฟฟ้า.** (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] นิพนธ์ ธาดาสิทธิ์. (2557). การประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่าของสถานีจ่ายไฟฟ้าสำหรับ  
สนามบินของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ).
- [10] ยุทธนา เฟื่องฟูง. (2557). โปรแกรมประเมินความเสี่ยงจากฟ้าผ่าที่ส่งผลกระทบต่ออาคารติดตั้ง  
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน IEC 62305-2:2010. (วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร).
- [11] N.H. Zaini, M. Z. A. Ab-Kadir, M. Izadi, N.I. Ahmad, M.A.M Radzi and N. Azis, & W.Z.  
Wan Hasan.(2016). On the Effect of Lightning on a Solar Photovoltaic System,  
**International Conference on Lightning Protection, 33<sup>rd</sup>**, 1-4.
- [12] อานนท์ ส่งแสง, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และอรรถ พะยอมหอม. (2559). กรณีศึกษาการลด  
ผลกระทบจากฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, **12** (1),  
53-64.
- [13] กิตติชัย ชัยเพชร. (2559). การสร้างแบบจำลองระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้างเพื่อศึกษา  
ค่าความเหนี่ยวนำมีผลต่อวาปฟ้าผ่าด้านข้าง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [14] Md. Saifur Rahman. (2008). **Basics of Electricity**, Retrieved from [https://www.researchgate.net/figure/Benjamin-Franklin-and-his-Kite-experiment-He-proved-that-lightning-was-a-form-of\\_fig2\\_303309704](https://www.researchgate.net/figure/Benjamin-Franklin-and-his-Kite-experiment-He-proved-that-lightning-was-a-form-of_fig2_303309704)
- [15] สำราญ สังข์สะอาด. (2547). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). (2557). **มาตรฐานการป้องกัน  
ฟ้าผ่า ภาคที่ 1 ข้อกำหนดทั่วไป**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Wang Jia Zhang Xiaoqing. (2006). Double-Exponential Expression of Lightning  
Current Wave forms. **Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics,**  
**4<sup>th</sup>**, 320-323.
- [18] สุวัฒน์ หนูคีรี. (2552). **ฟ้าผ่าภัยธรรมชาติที่น่าสะพรึงกลัว**. สืบค้นจาก <http://seedang.com/stories>
- [19] สำราญ สังข์สะอาด. (2557). **ความปลอดภัยจากฟ้าผ่า**. สืบค้นจาก [http://eitprblog.blogspot.com/2014/06/blog-post\\_25.html](http://eitprblog.blogspot.com/2014/06/blog-post_25.html)

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] ราเชษฐ์ บุตรโพธิ์. (2560, มกราคม). การป้องกันฟ้าผ่า (**Lightning and Surge Protection**). เอกสารนำเสนอในการบรรยายระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยภาควิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี.
- [21] คุณิต เครื่องาม, ชุมพล อันตรเสน และบรรยง โตประเสริฐพงศ์. (2537). **เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน**. (รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- [22] Avi Solar Energy. (2018). **Maximum Power Point Tracking Technique**, Retrieved from <https://blog.avisolar.com/hill-climbing-technique-technique/>
- [23] Powered by Manitoba Hydro International Ltd. (2018). **PSCAD™ Power Systems Computer Aided Design**, Retrieved from [https://hvdc.ca/uploads/knowledge\\_base/what\\_s\\_new\\_in\\_pscad\\_v4\\_6\\_0.pdf](https://hvdc.ca/uploads/knowledge_base/what_s_new_in_pscad_v4_6_0.pdf)
- [24] Enrico Pons and Riccardo Tommasini. (2013). Lightning Protection of PV Systems. **International Youth Conference on Energy (IYCE), 4<sup>th</sup>**, 1-5.
- [25] บริษัท โซลาร์ อีพีซีเอฟ จำกัด. (2558). **โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 6 MW โครงการบ้านลำ 1**. เอกสารไม่ตีพิมพ์
- [26] เซลล์แสงอาทิตย์. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 13 มิถุนายน 2561, จากวิกิพีเดีย <https://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์แสงอาทิตย์>.
- [27] บริษัท 17 อัญญูวีร์ โซลคิง จำกัด. (2558). **สเปคแผงเซลล์แสงอาทิตย์**. เอกสารไม่ตีพิมพ์
- [28] Abdulrahman Kalbat. (2013). PSCAD Simulation of Grid-Tied Photovoltaic Systems and Total Harmonic Distortion Analysis. **International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 3<sup>th</sup>**, 1-6.
- [29] Li Bing, Zhong Li Jun, WANG Gang and TIAN Xiaojian. MPPT Control Method of PV Based on subregional variable duty cycle. **International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2015), 4<sup>th</sup>**, 1574-1578.
- [30] บริษัท 17 อัญญูวีร์ โซลคิง จำกัด. (2558). **สเปคเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า**. เอกสารไม่ตีพิมพ์

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] Valdemir S. Brito, George R. S. Lira, Edson G. Costa, & Marcelo J. A. Maia. (2018). A Wide-Range Model for Metal-Oxide Surge Arrester. **IEEE Transactions On Power Delivery**, **33**(1), 102-109.
- [32] Katalog Niederspannungsprodukte Teil 2. สืบค้นจาก [http://www.niederspannungskatalog.de/pdf\\_2/ABB\\_Teil2\\_Kap01\\_Sicherungsautomaten\\_Stand\\_09-2017.pdf](http://www.niederspannungskatalog.de/pdf_2/ABB_Teil2_Kap01_Sicherungsautomaten_Stand_09-2017.pdf)
- [33] IEC 62305. **Protection against lightning - Part 1: General principles**, Retrieved from <https://webstore.iec.ch/publication/6793>.
- [34] P. Yutthagowith and N. Pattanadech. (2016). Improved Least-Square Prony Analysis Technique for Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage and Current. **IEEE Transactions On Power Delivery**, **31**(1), 271-276.
- [35] ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์. (2549). ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. [เอกสารอัดสำเนา]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



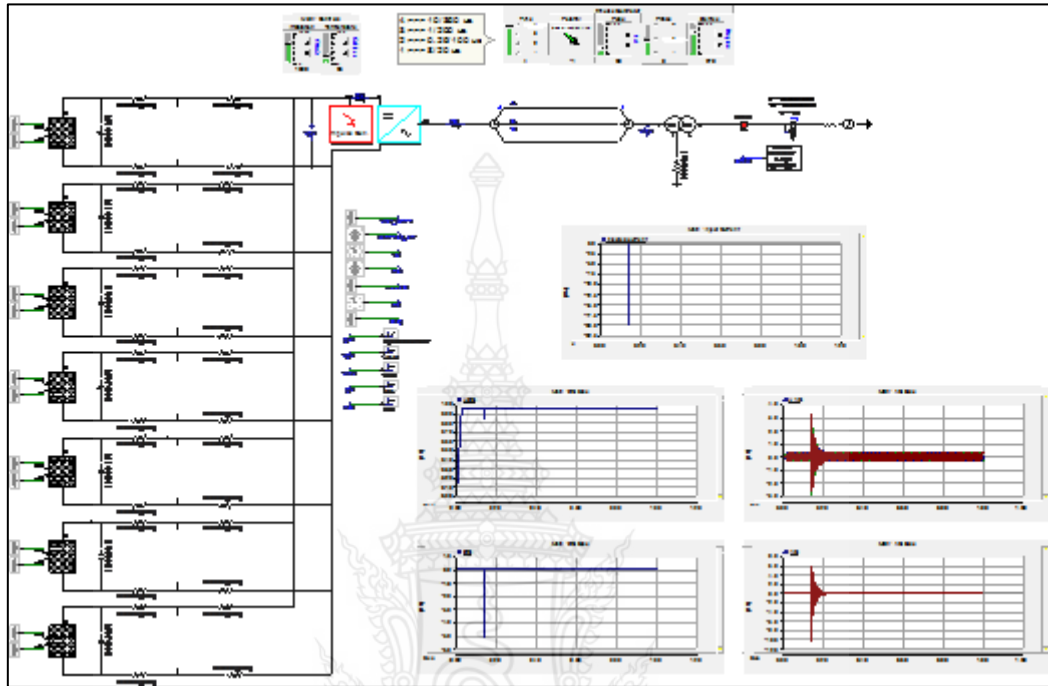
ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PSCAD Program Solution

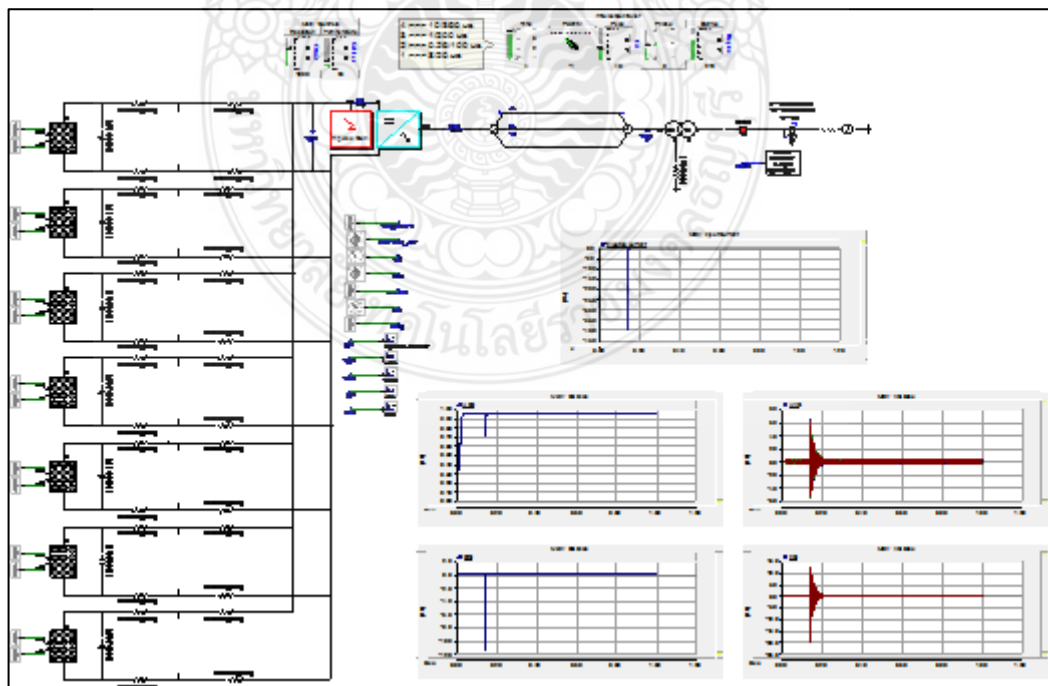


# 1. กรณีฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

## 1.1 ฟ้าผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟ้าผ่า 10/350 $\mu$ s, กระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA

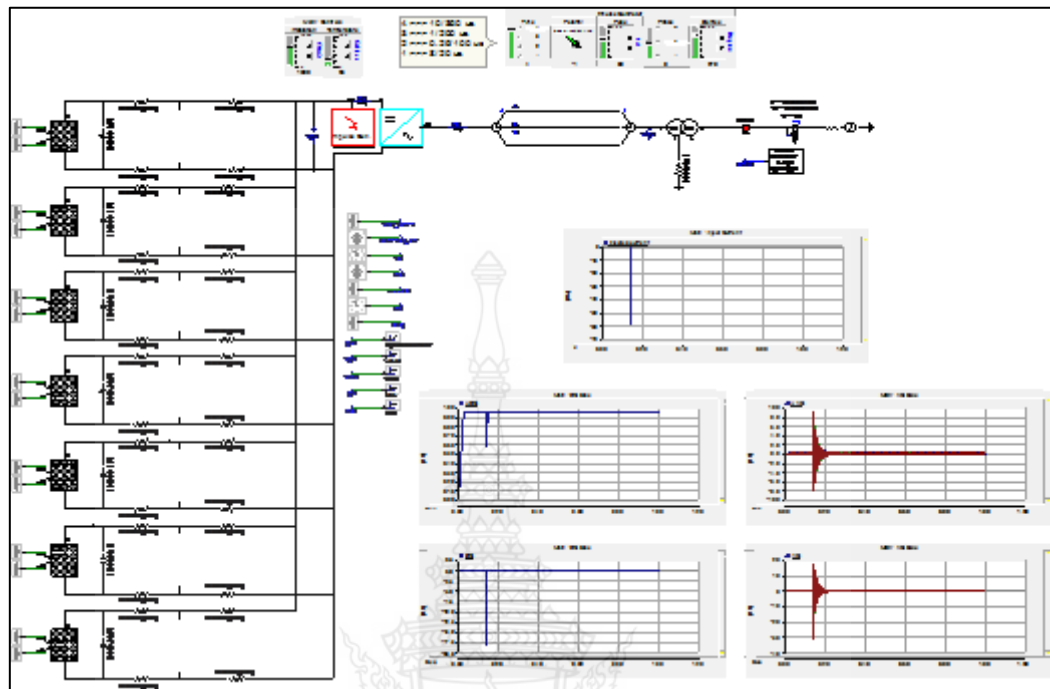


## 1.2 ฟ้าผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟ้าผ่า 10/350 $\mu$ s, กระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA

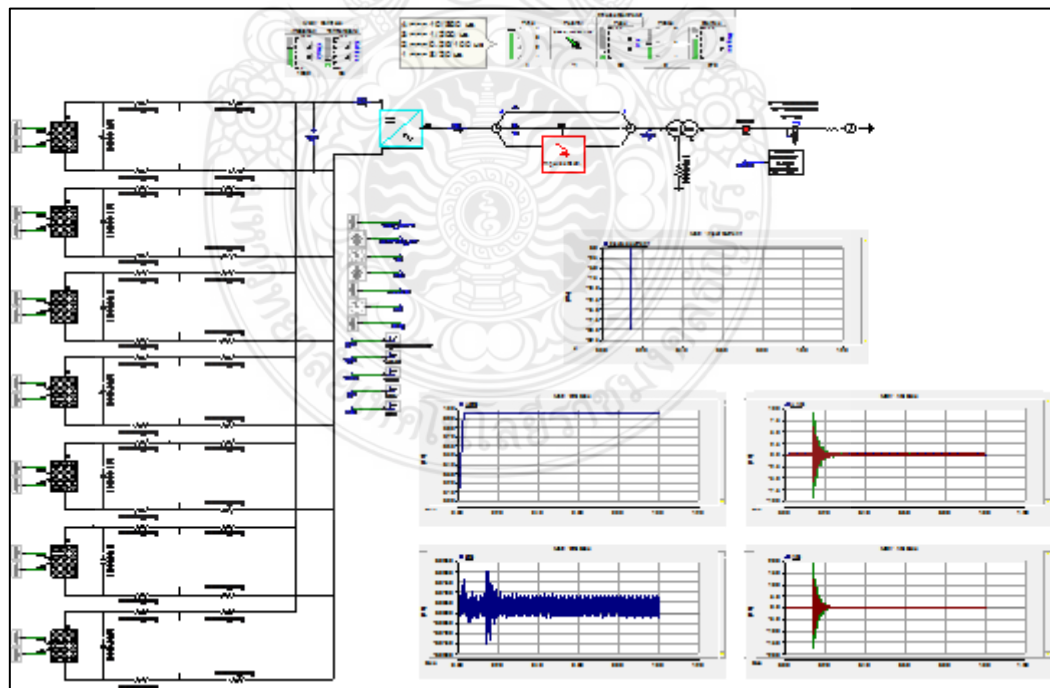




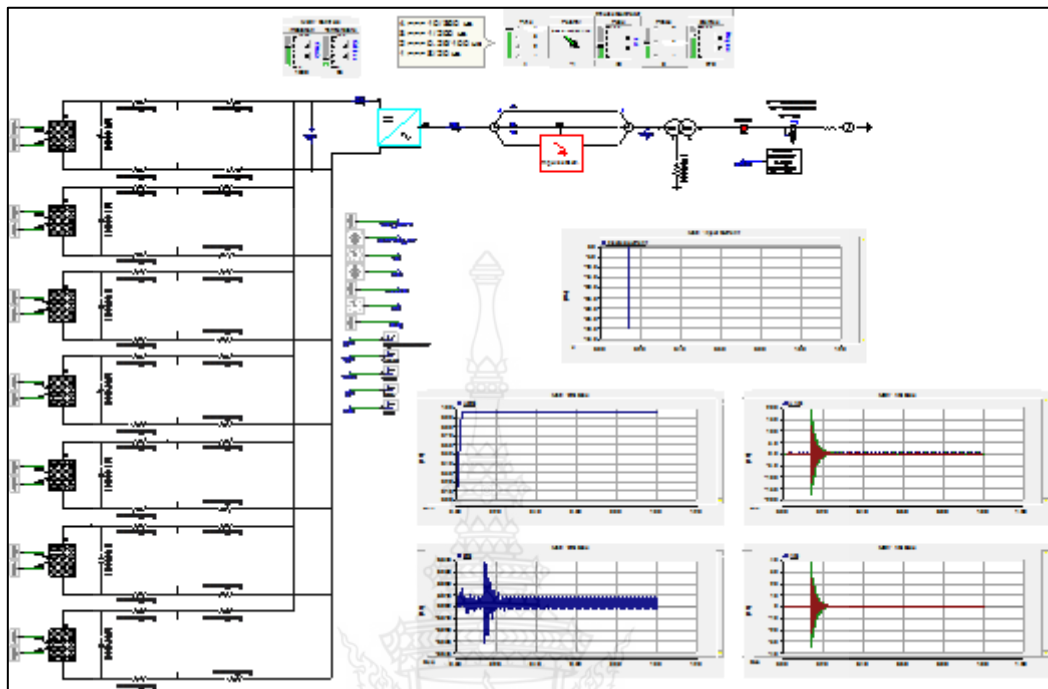
1.3 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



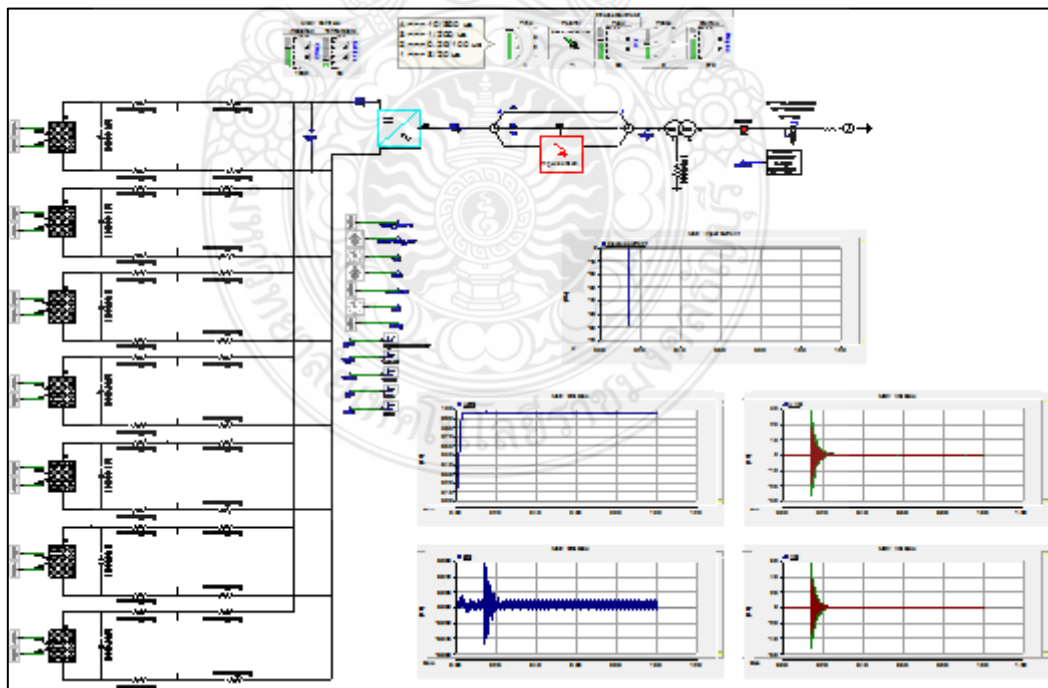
1.4 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



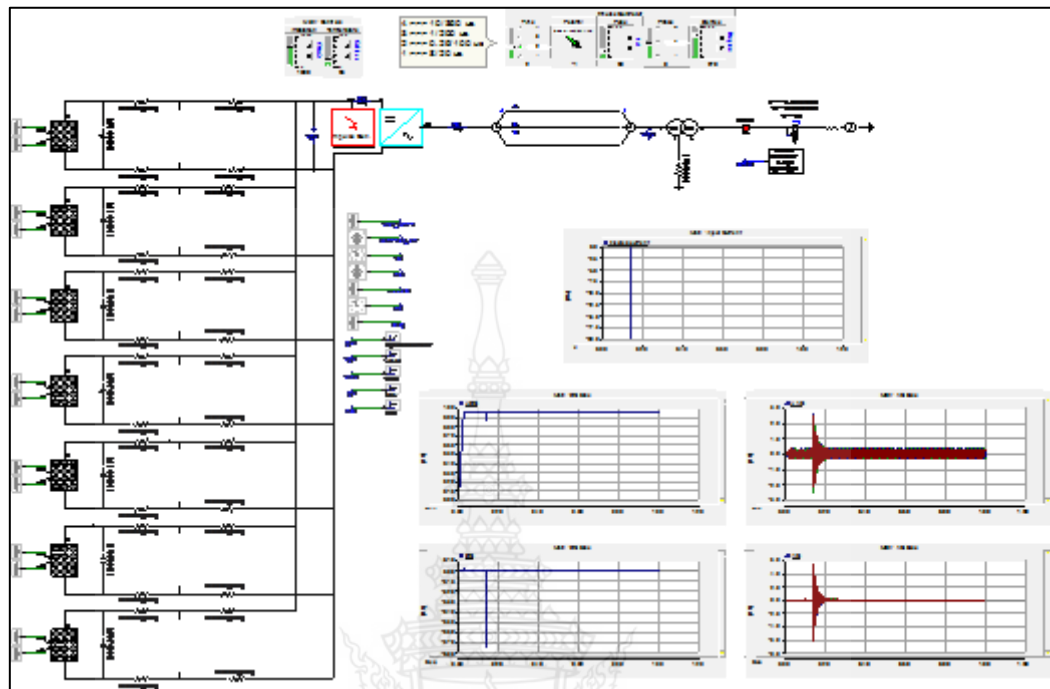
1.5 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นไฟฟ้า 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



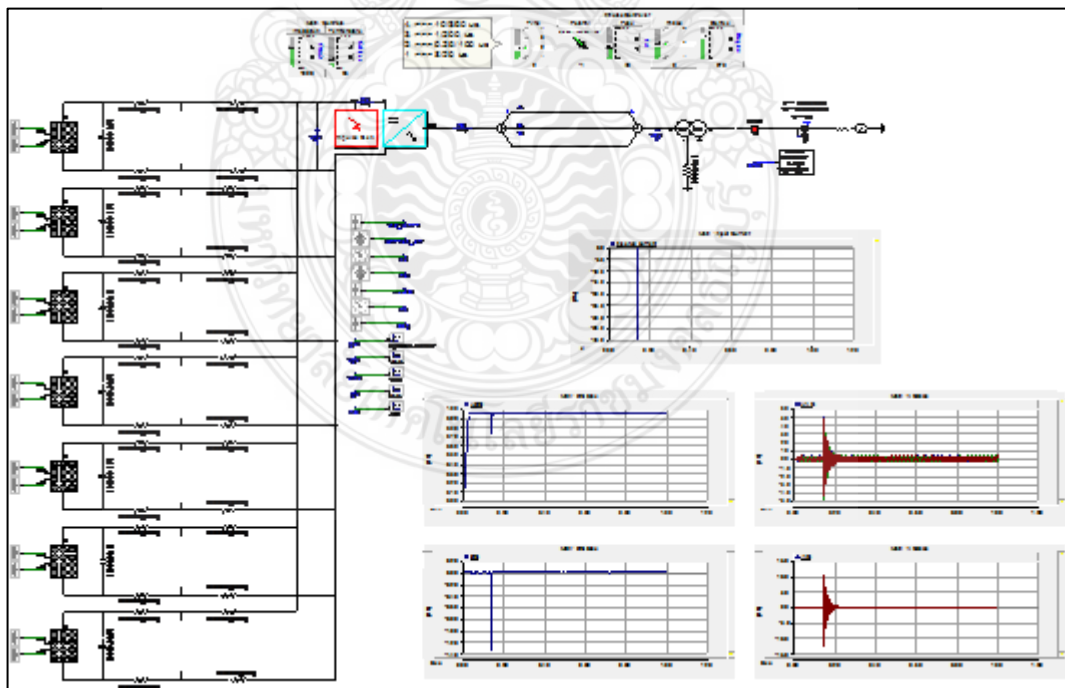
1.6 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นไฟฟ้า 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



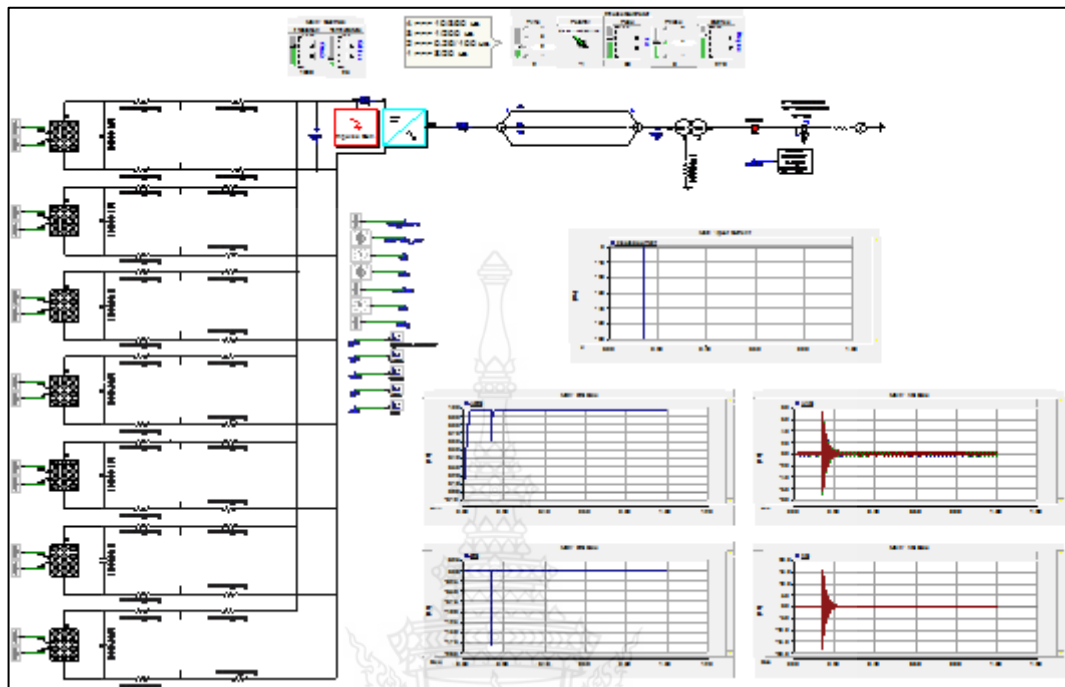
1.7 ไฟผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นไฟฟ้าผ่า 0.25/100  $\mu$ s, กระแสไฟฟ้าผ่าขนาด 20 kA



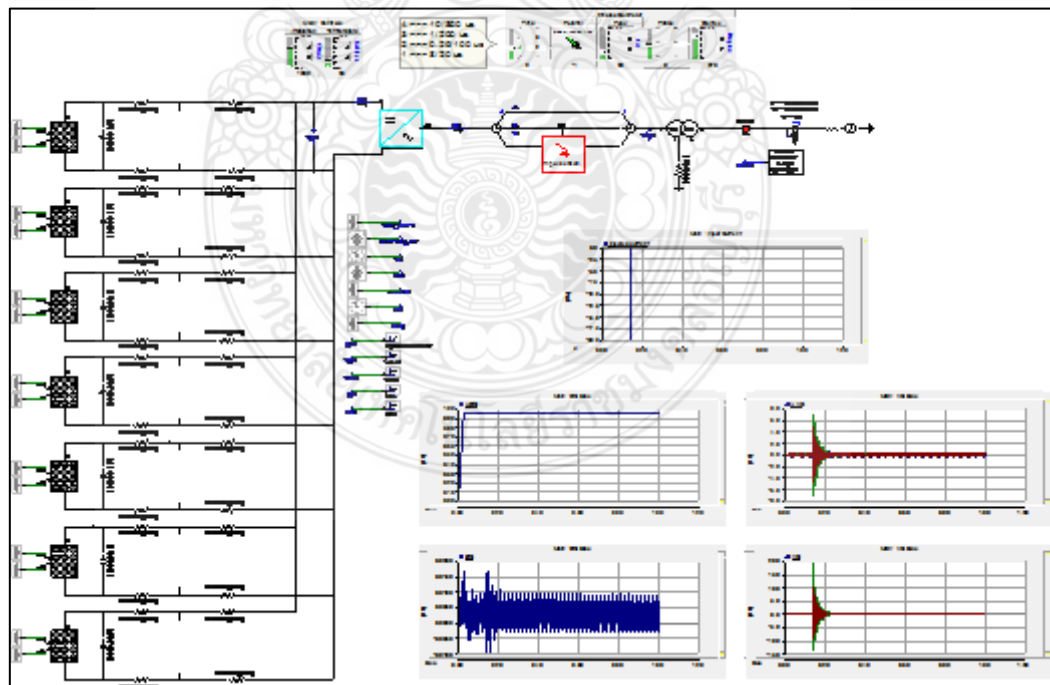
1.8 ไฟผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นไฟฟ้าผ่า 0.25/100  $\mu$ s, กระแสไฟฟ้าผ่าขนาด 40 kA



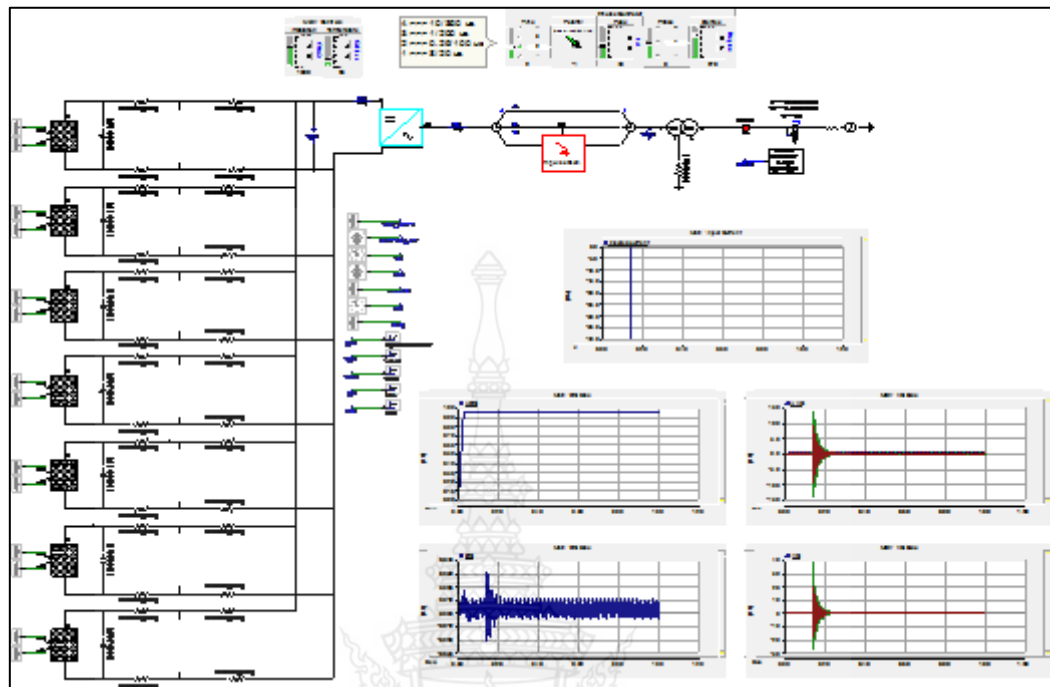
1.9 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



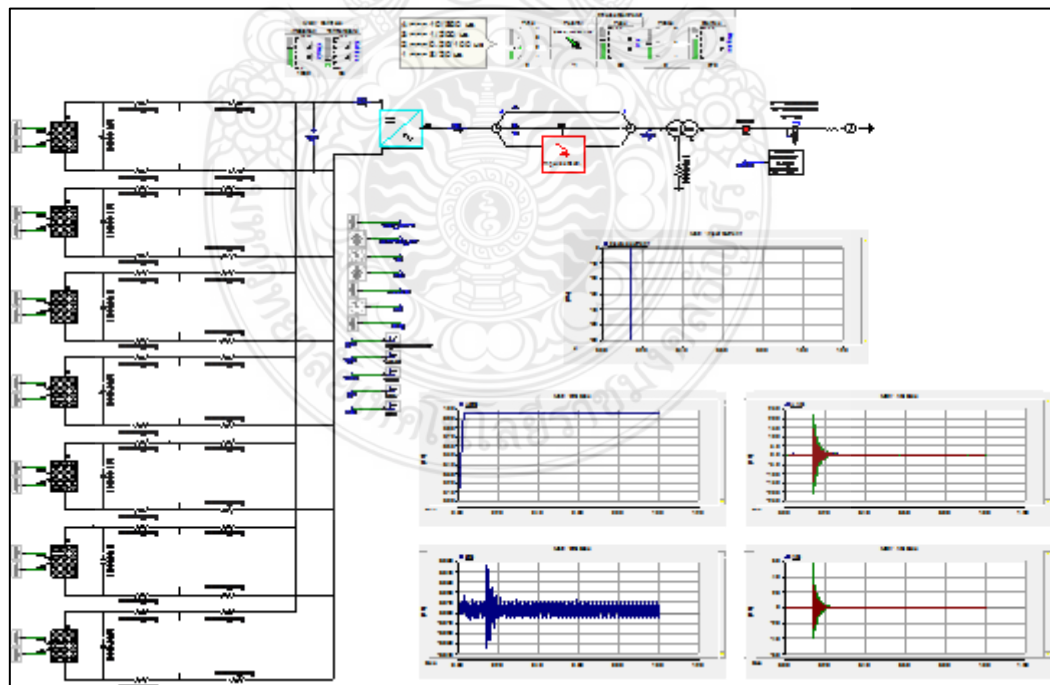
1.10 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



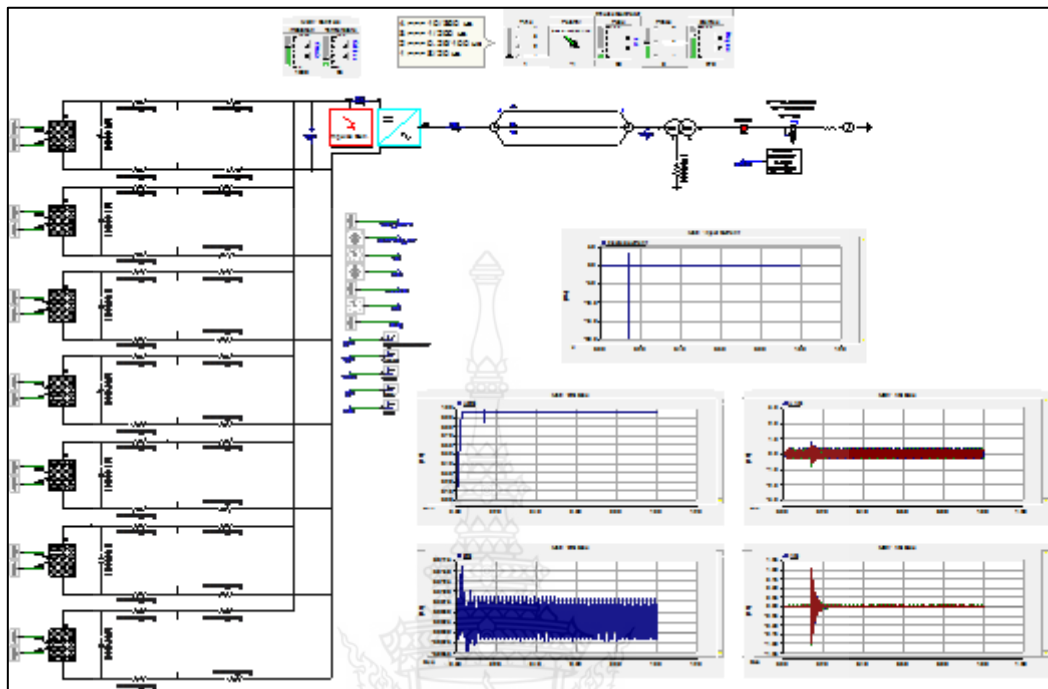
1.11 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100 $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



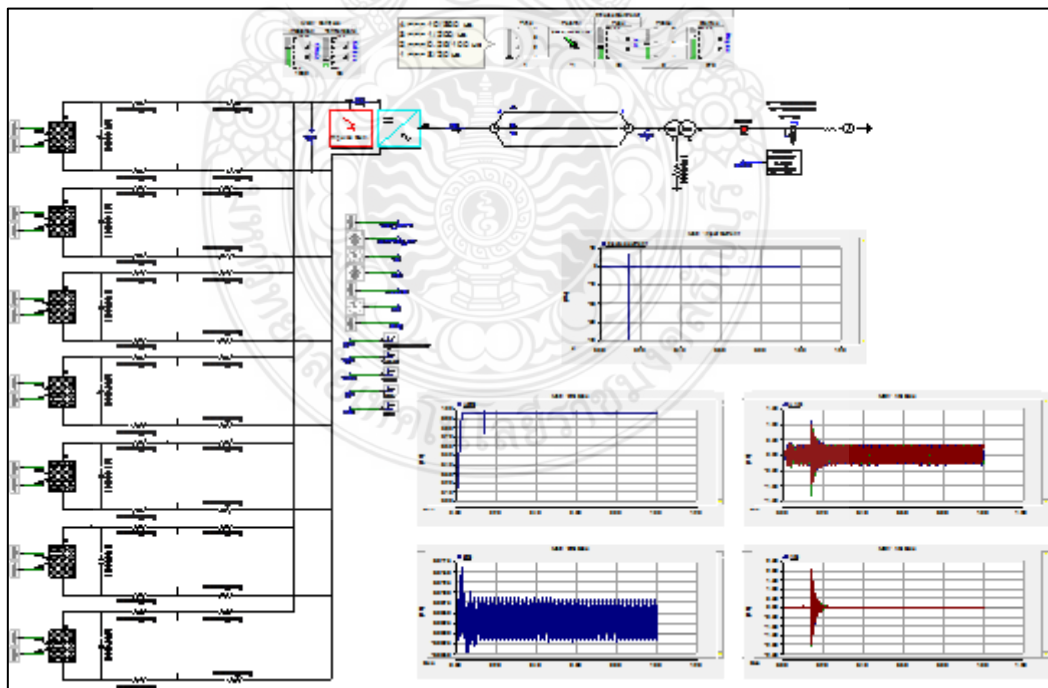
1.12 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100 $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



1.13 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA

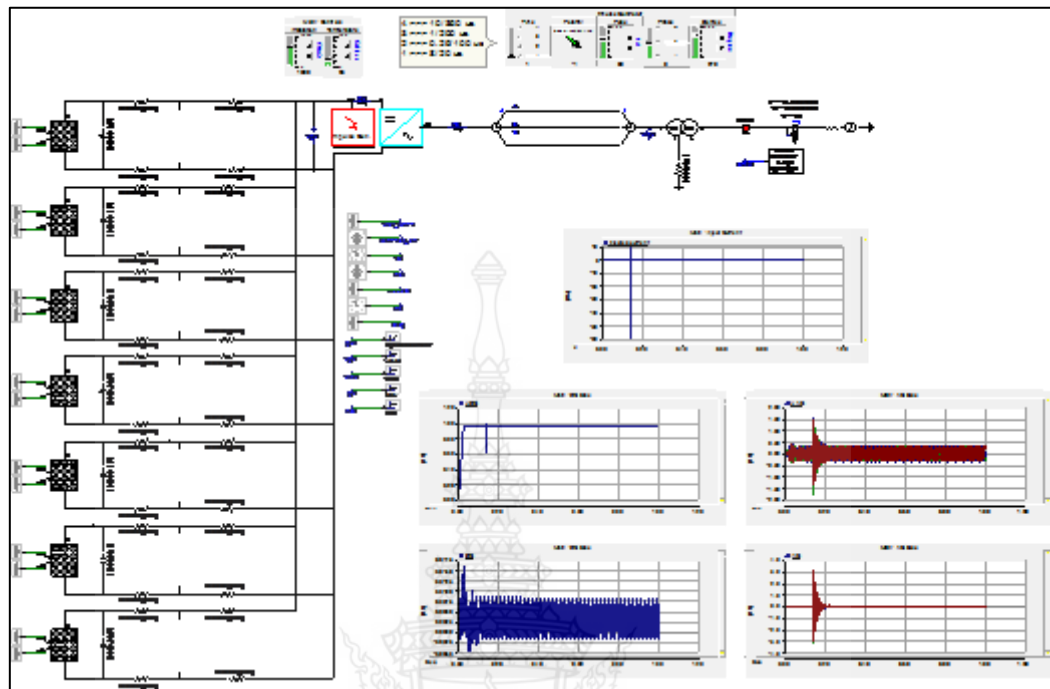


1.14 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA

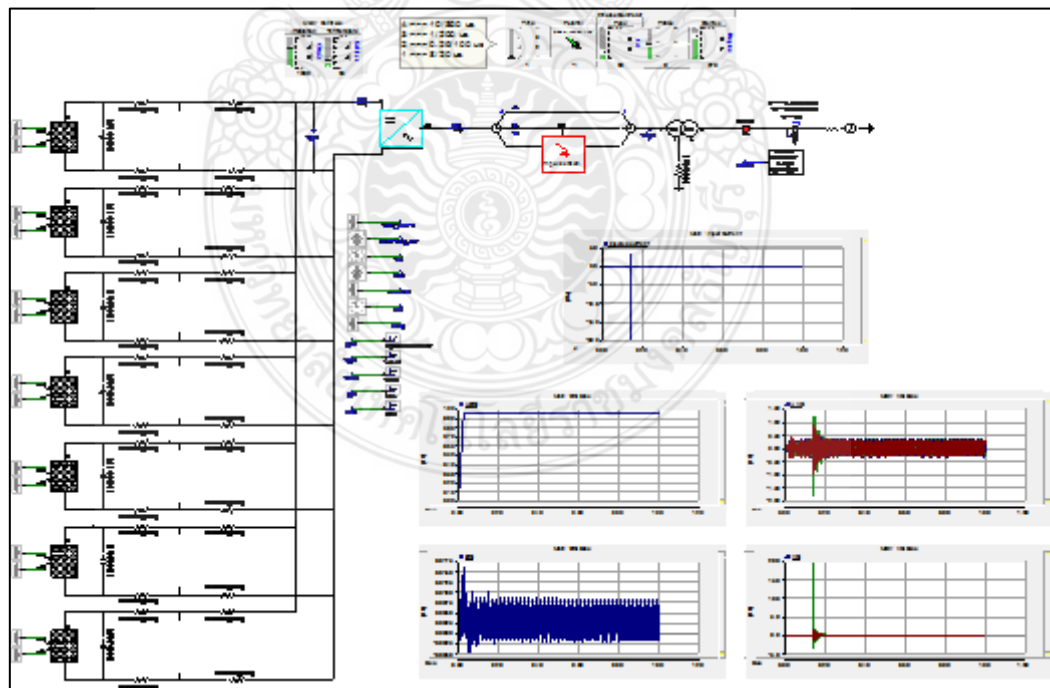




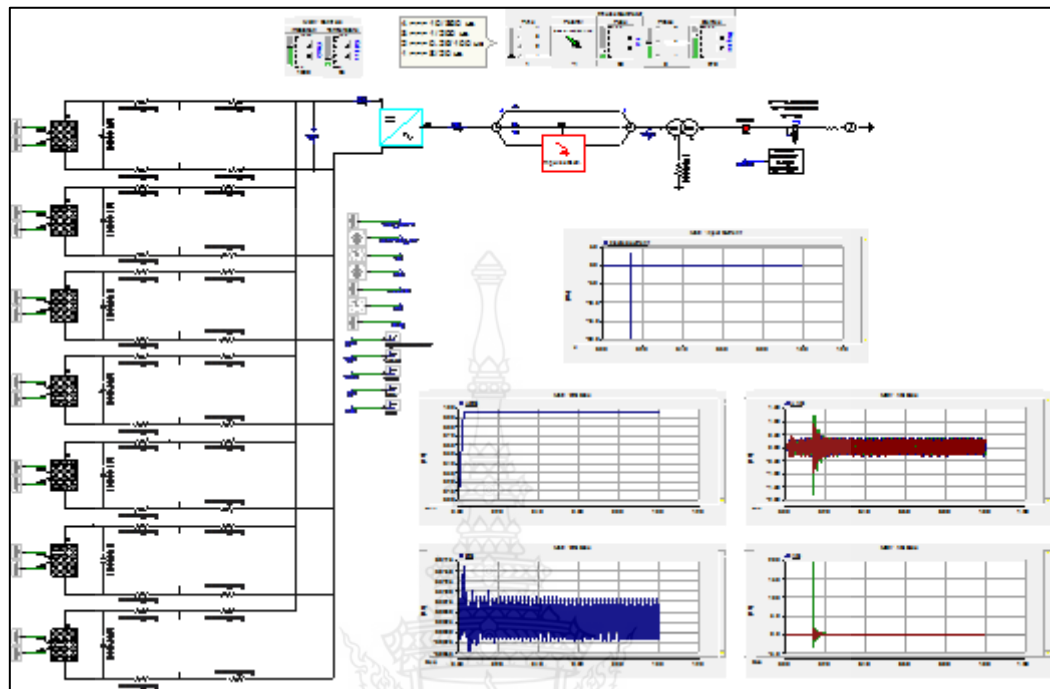
1.15 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



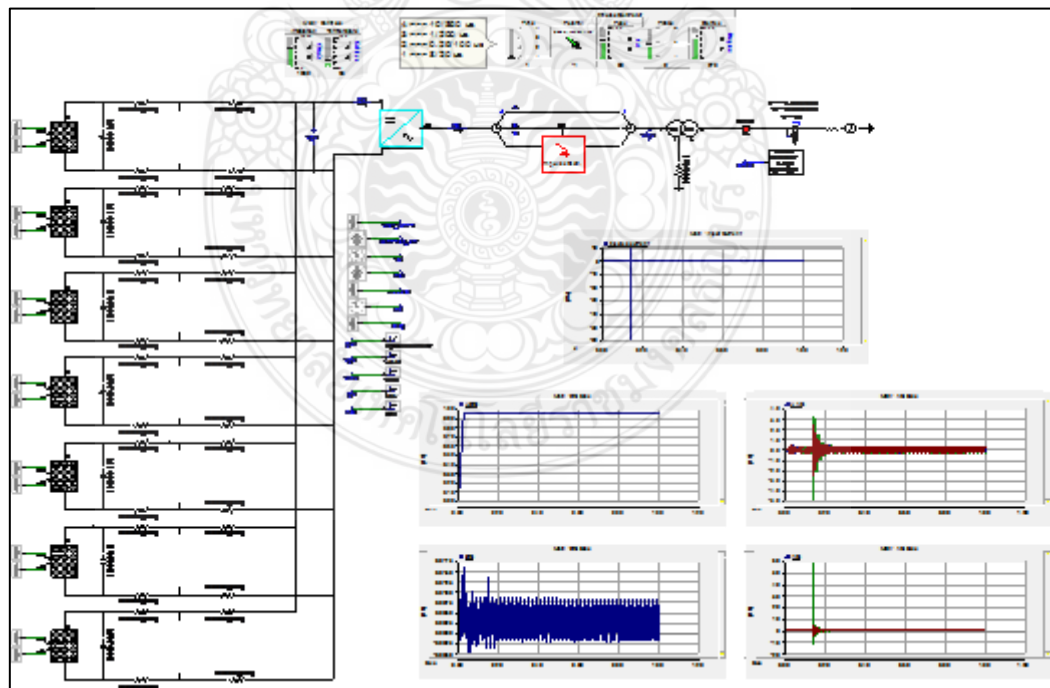
1.16 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



1.17 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA

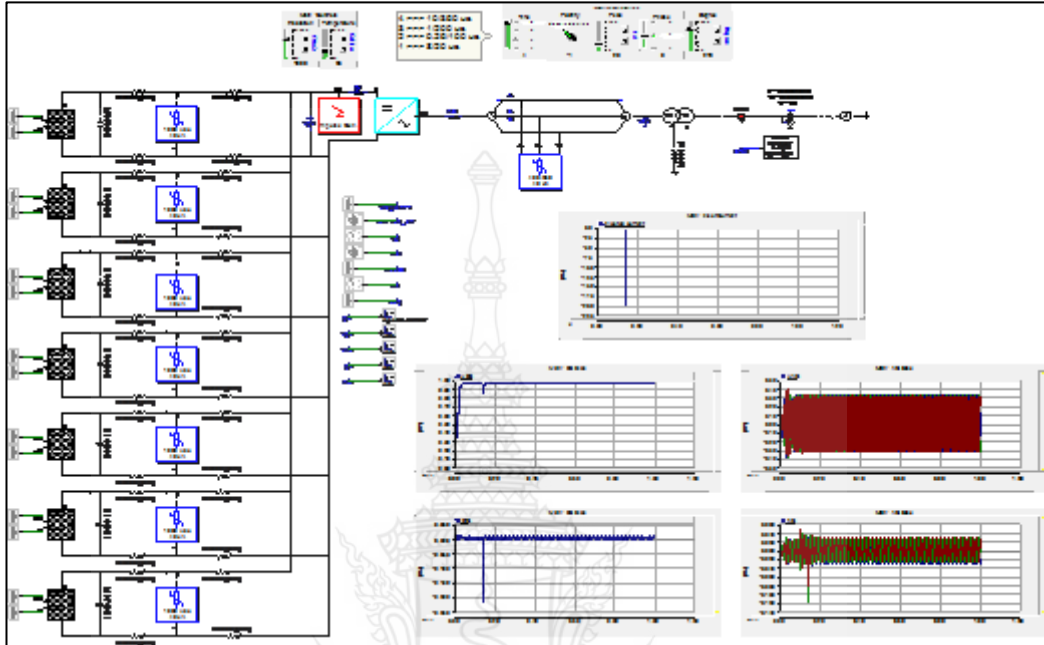


1.18 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA

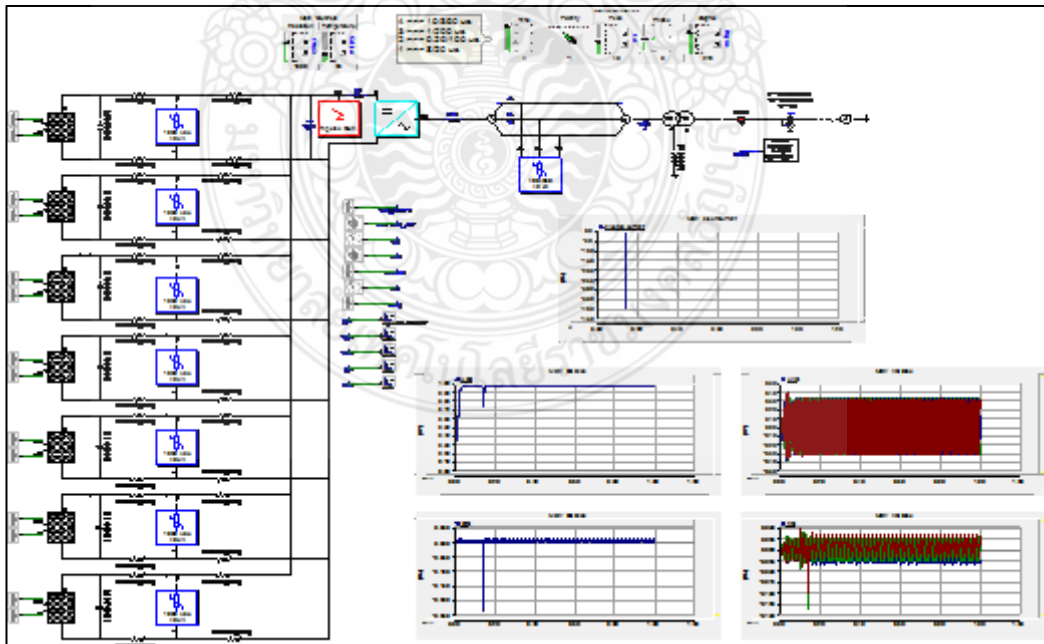


## 2. กรณีฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

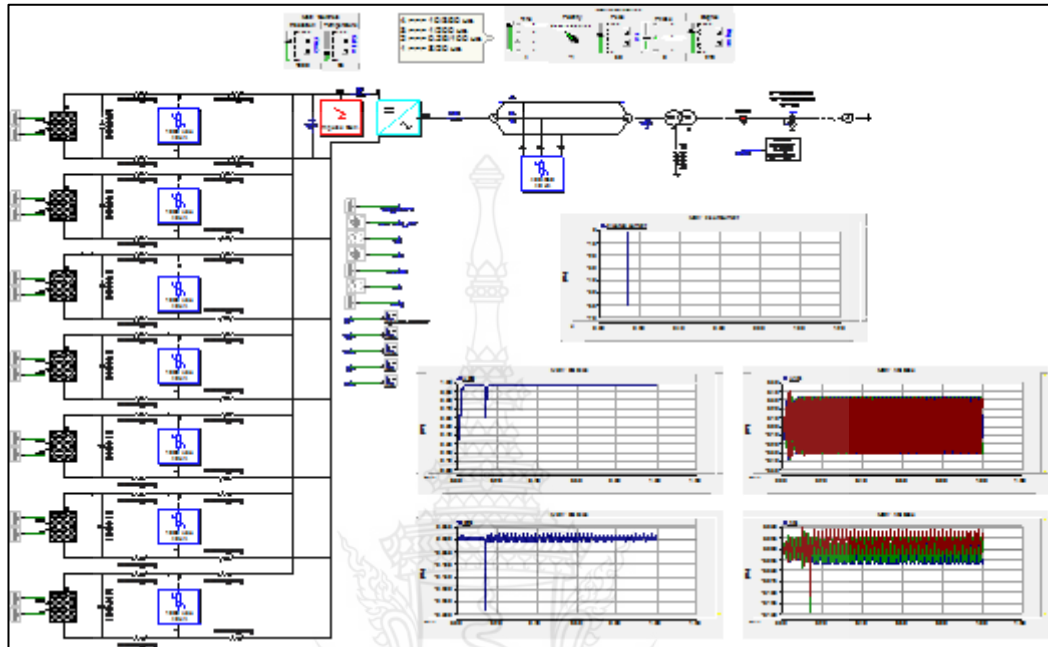
### 2.1 ฟ้าผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟ้าผ่า 10/350 $\mu$ s, กระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA



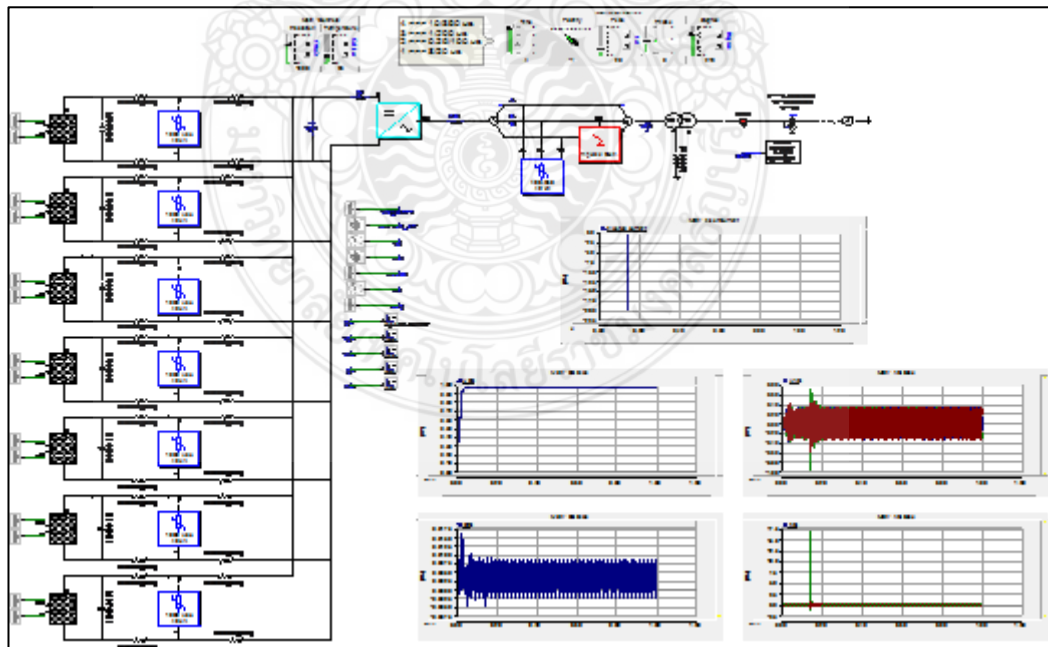
### 2.2 ฟ้าผ่าสายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟ้าผ่า 10/350 $\mu$ s, กระแสฟ้าผ่าขนาด 40 kA



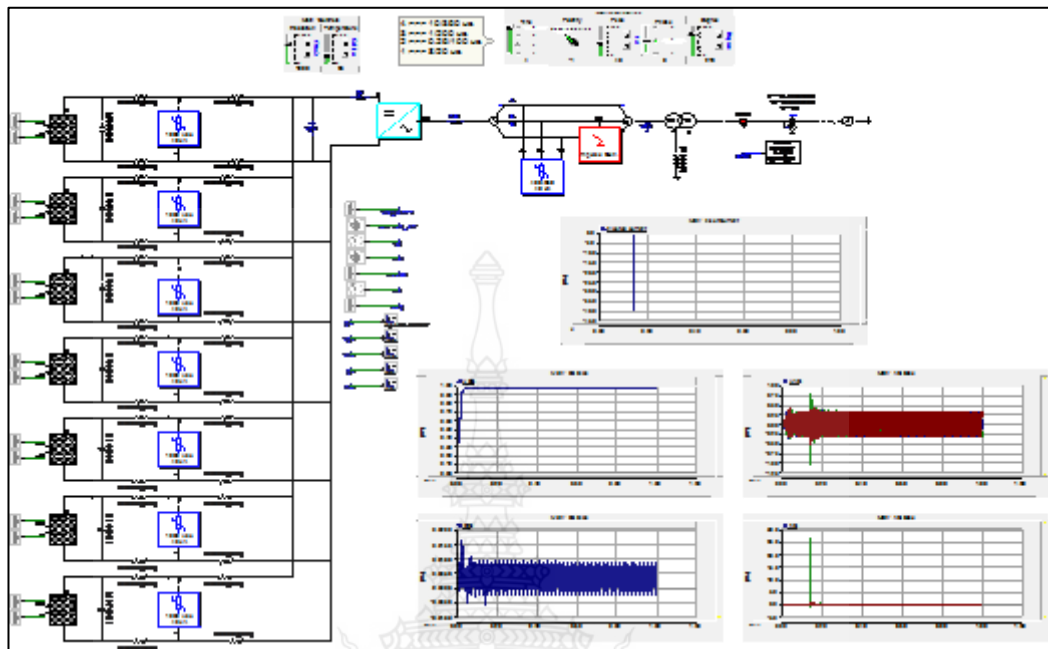
2.3 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



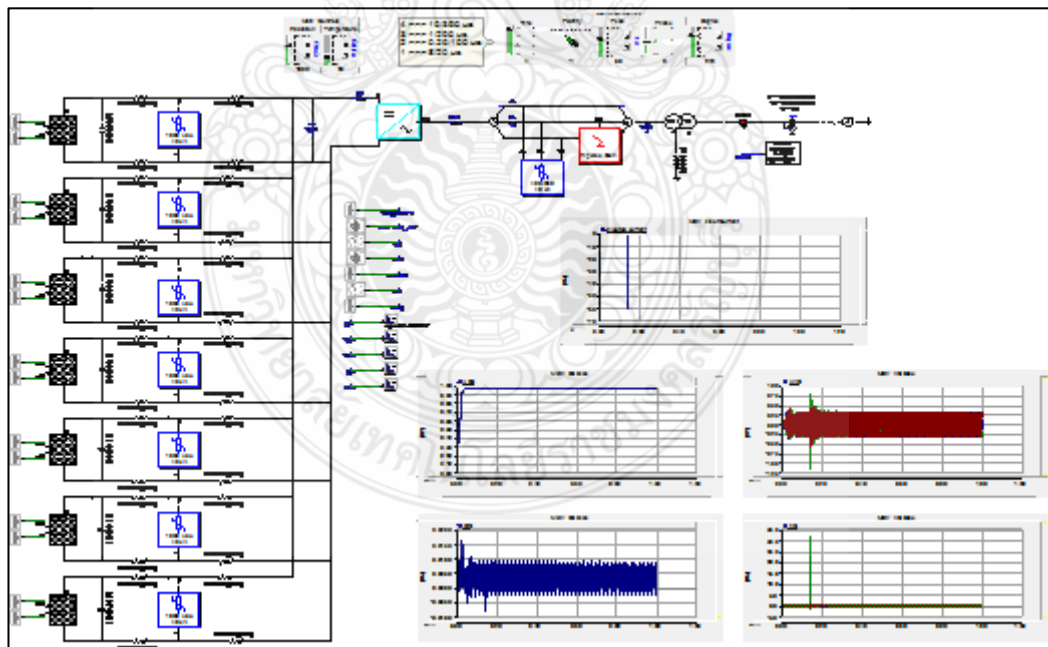
2.4 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



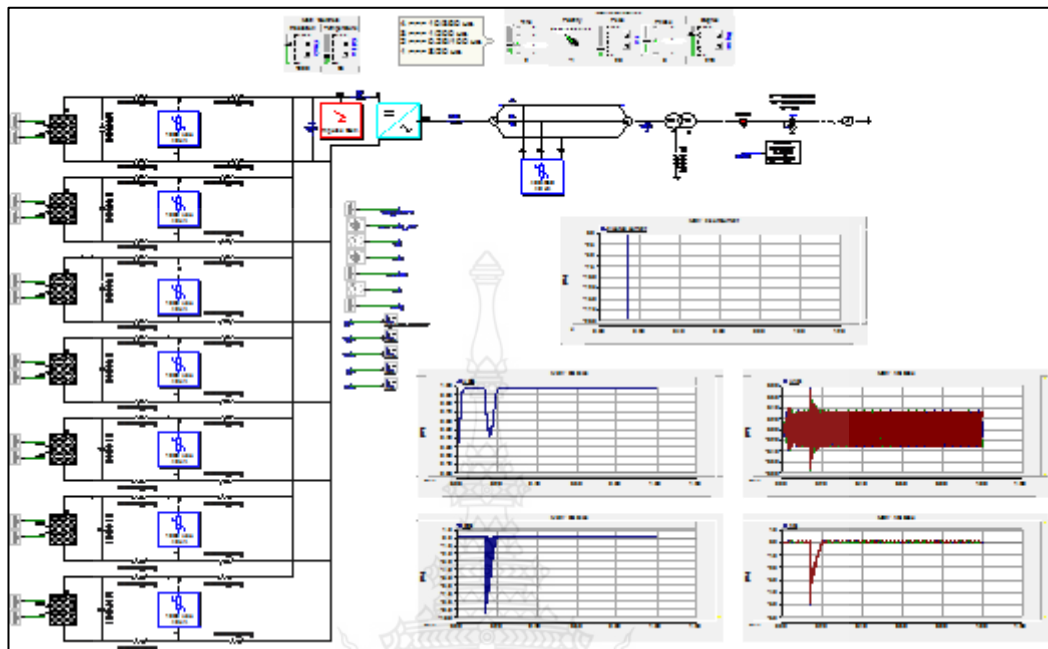
2.5 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



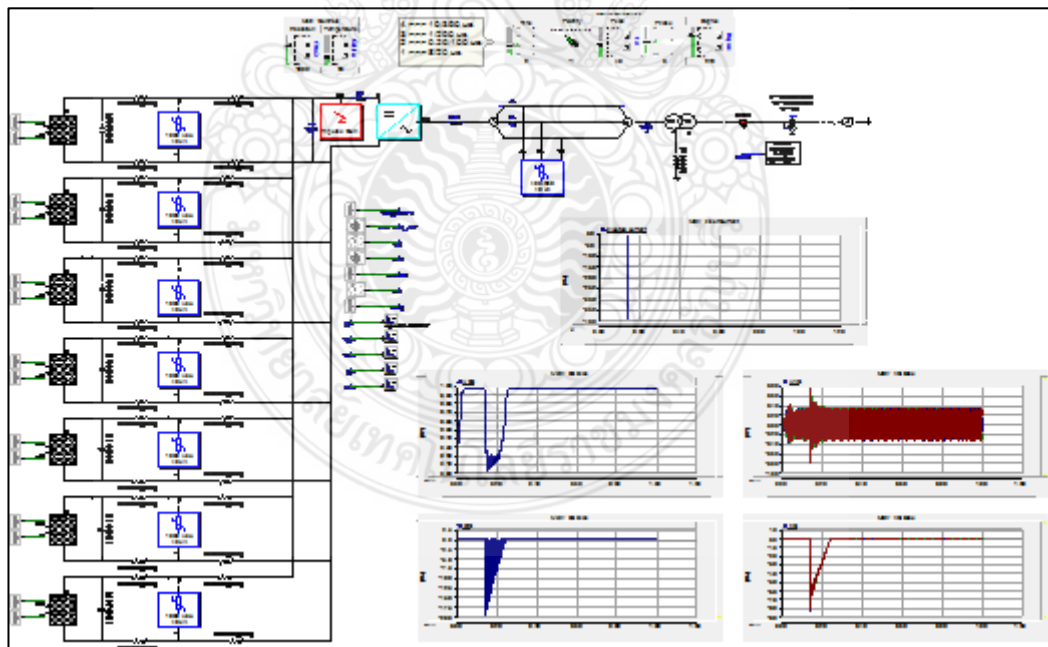
2.6 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 10/350  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



2.7 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA

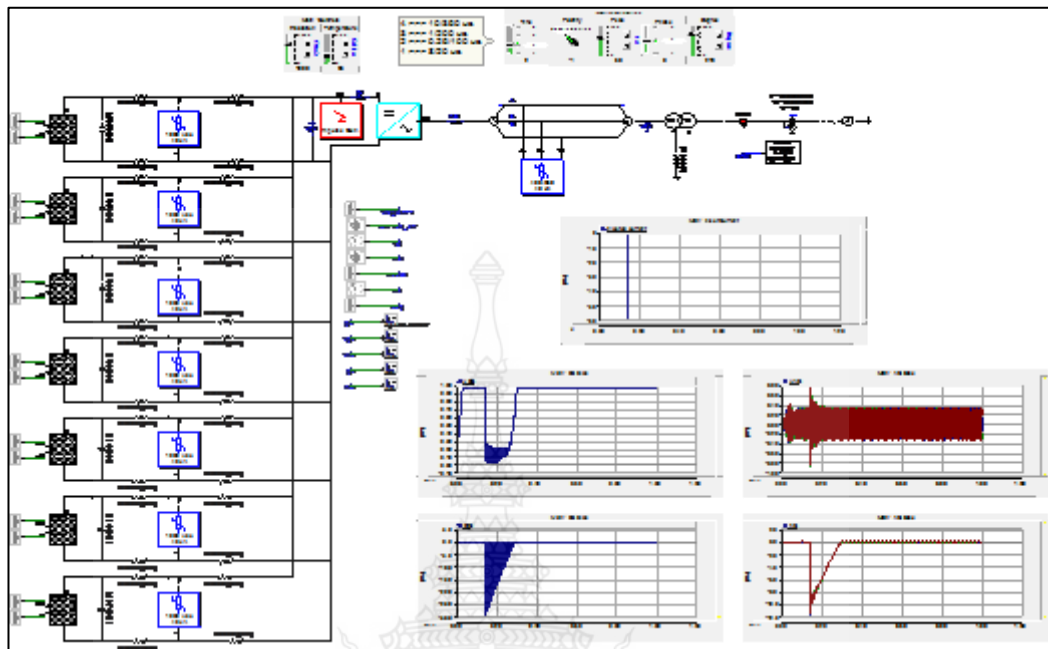


2.8 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA

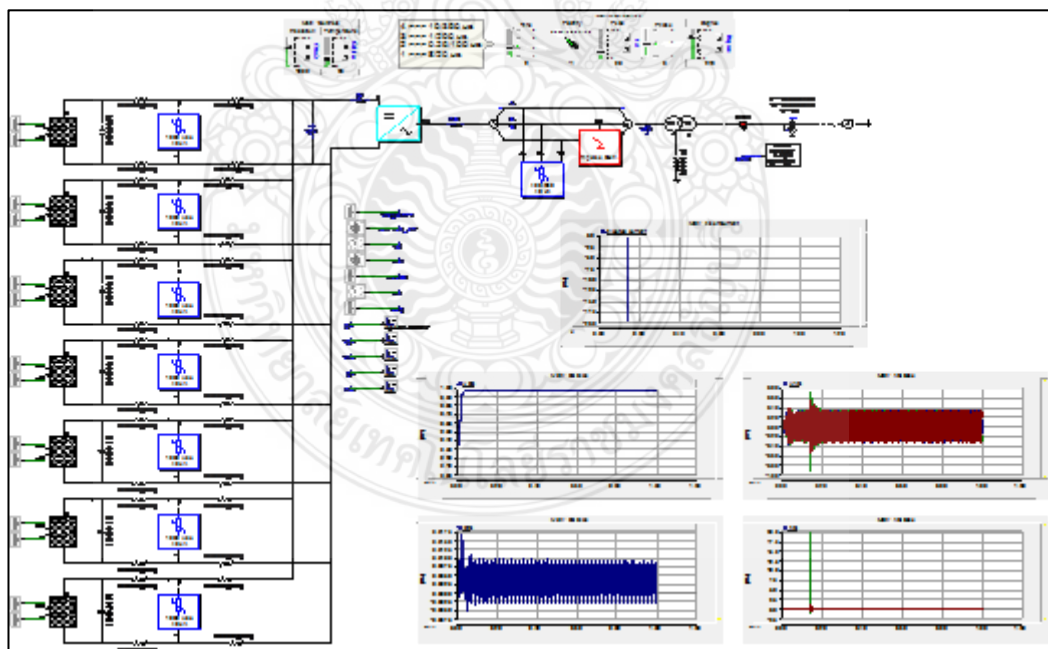




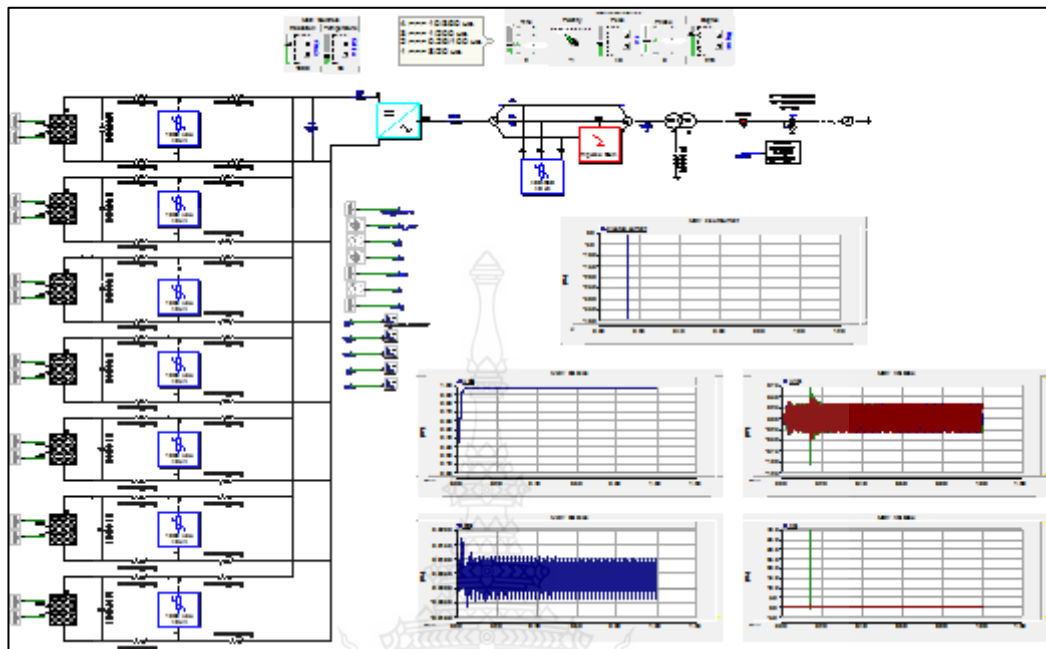
2.9 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



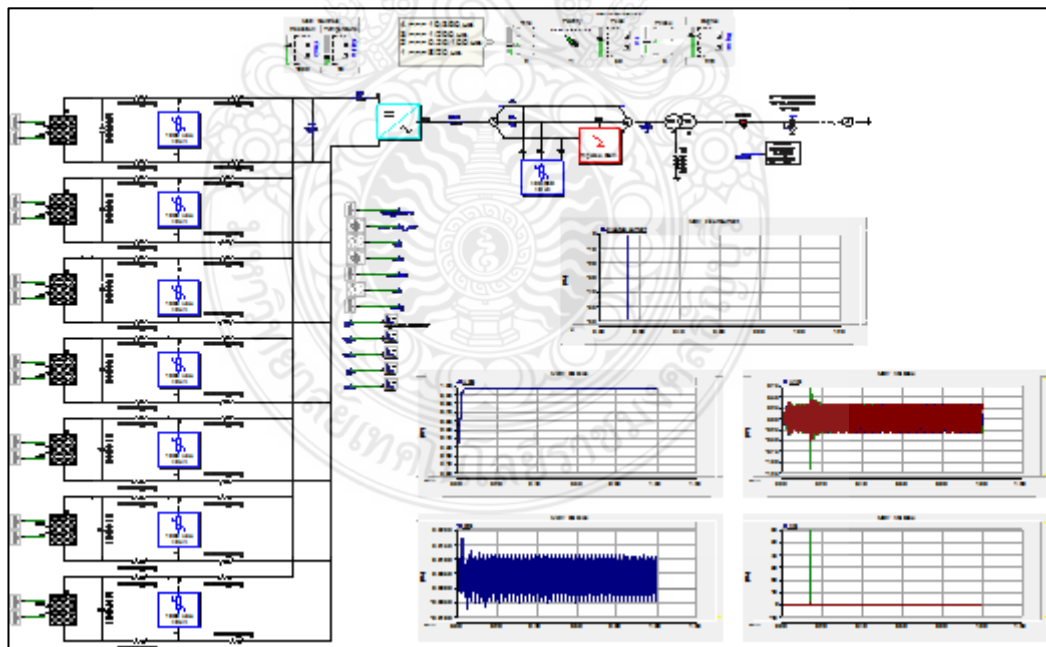
2.10 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



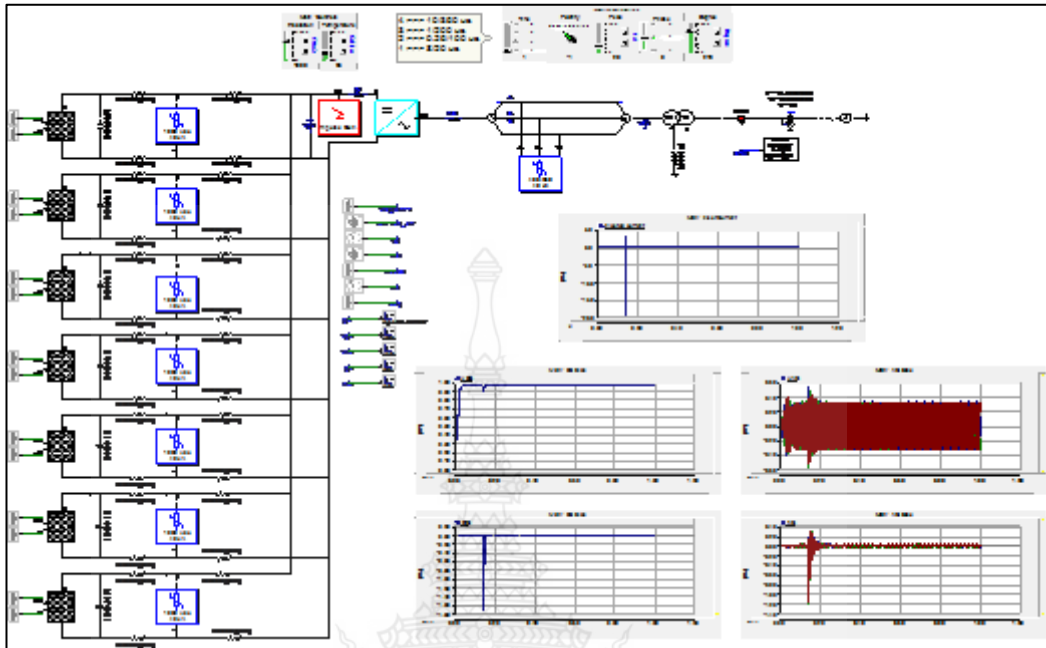
2.11 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100 $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



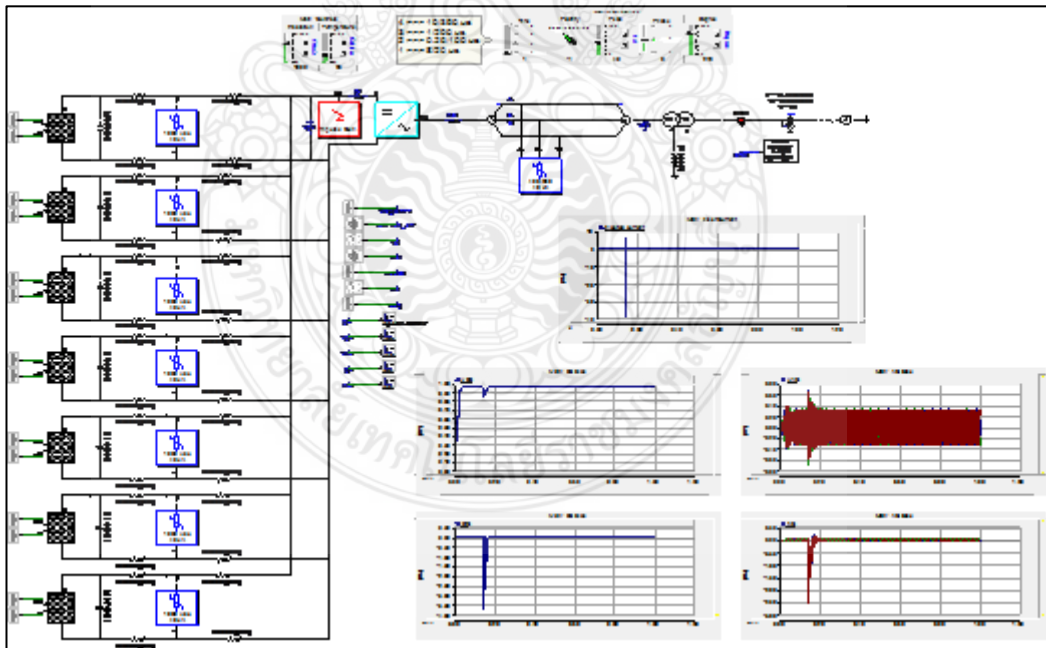
2.12 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 0.25/100 $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



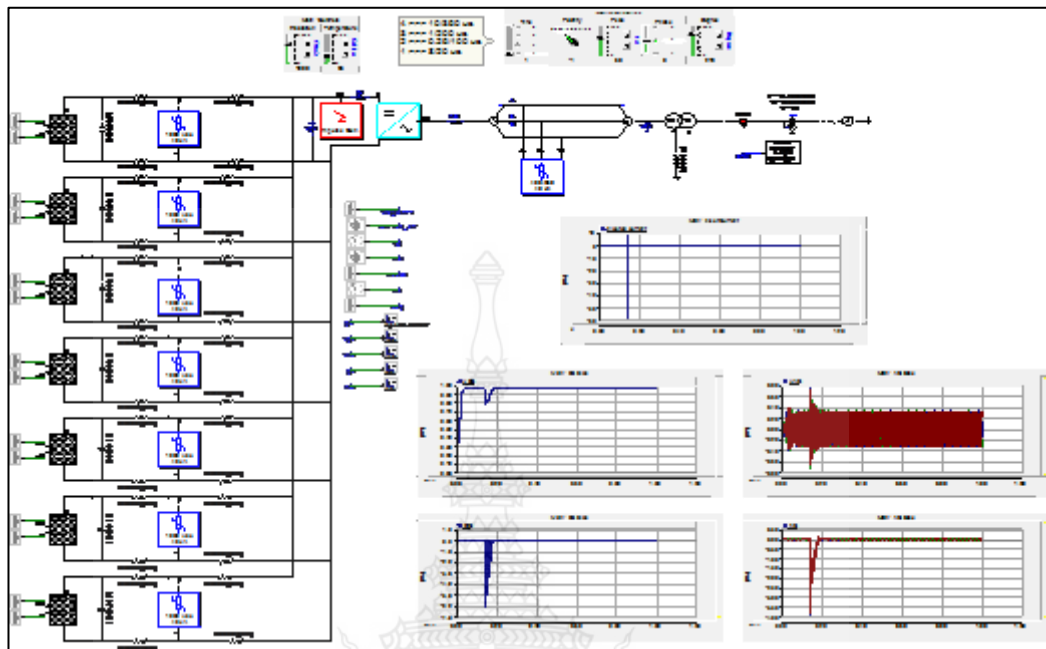
2.13 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



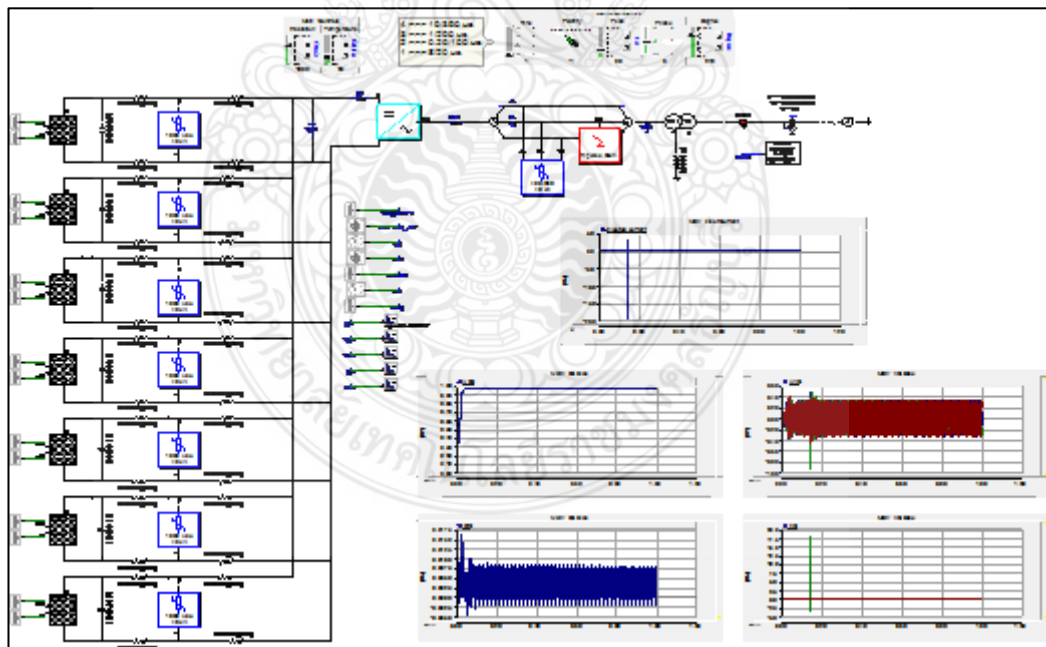
2.14 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



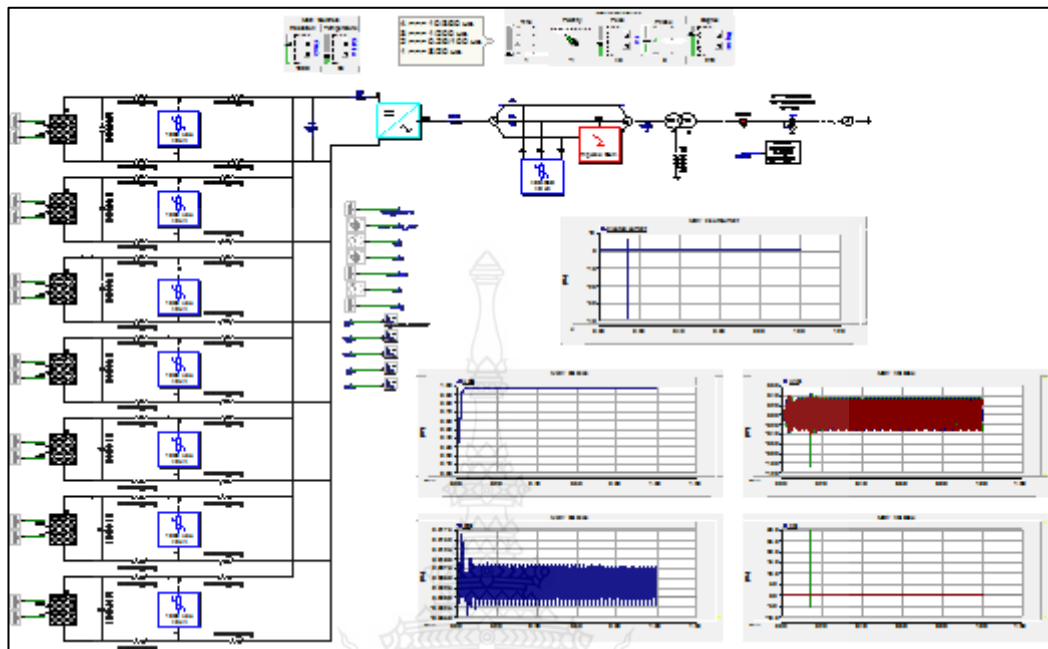
2.15 ฟิวส์สายไฟด้าน DC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA



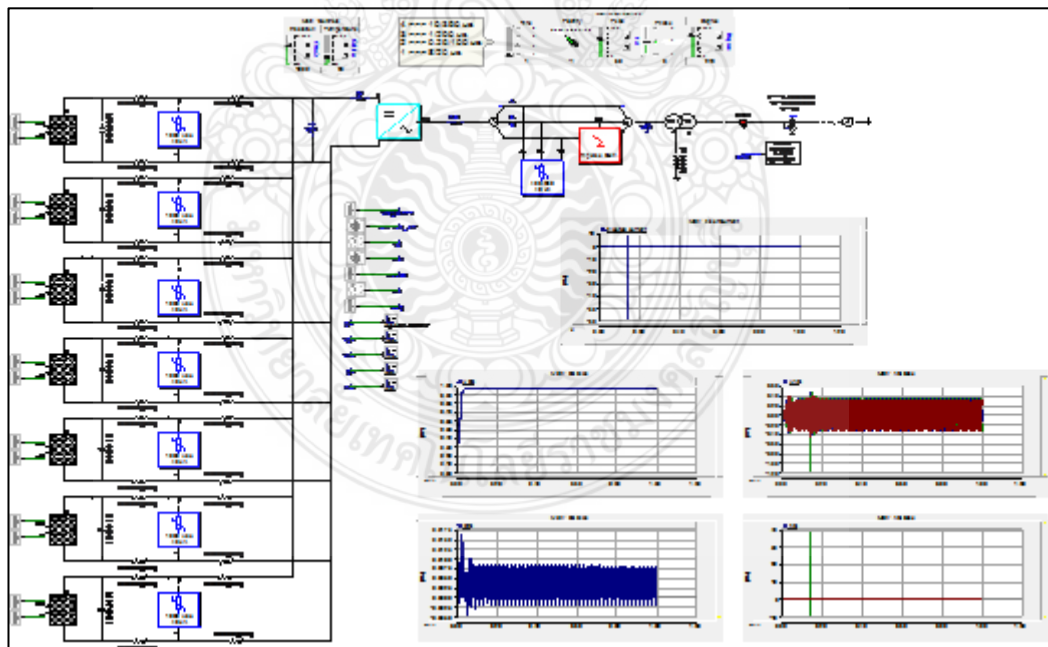
2.16 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 20 kA



2.17 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 40 kA



2.18 ฟิวส์สายไฟด้าน AC, รูปคลื่นฟิวส์ 8/20  $\mu$ s, กระแสฟิวส์ขนาด 60 kA





## ภาคผนวก ข

### ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. วิสรุต อัสวานัตรสกุล, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. “ผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า, EENET 2018, ครั้งที่ 10, 1-3 พฤษภาคม 2561, กาญจนบุรี,. pp. 87-90
2. วิสรุต อัสวานัตรสกุล, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. “แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินกรณีฟ้าผ่าทางตรง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, EECON, ครั้งที่ 41, 21-23 พฤศจิกายน 2561, อุบลราชธานี,. pp. 31-34





## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

### The 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018

วันที่ 1 - 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

ณ โรงแรมราชศุภมิตร-อาร์.เอส. โฮเต็ล (R.S. Hotel) อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี

**วิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อการพัฒนา ให้ชาติก้าวหน้า  
สู่ความมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน**

**ELECTRICAL ENGINEERING FOR NATIONAL DEVELOPMENT  
TO STABILITY, WEALTHIEST AND SUSTAINABILITY**

## Conference Topics

- |   |  |
|---|--|
| 1) Electrical Power (PW)                    | ๖ ไฟฟ้ากำลัง                             |
| 2) Power Electronics (PE)                   | ๗ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง                    |
| 3) Electronics (EL)                         | ๘ อิเล็กทรอนิกส์                         |
| 4) Electric Communication (CM)              | ๙ ไฟฟ้าสื่อสาร                           |
| 5) Control Systems and Instrumentation (CT) | ๑๐ ระบบควบคุมและการวัด                   |
| 6) Computer and Information Technology (CP) | ๑๑ คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ       |
| 7) Digital Signal Processing (DS)           | ๑๒ การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล              |
| 8) Energy and Energy Saving (ES)            | ๑๓ พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน          |
| 9) Innovation and Invention (IN)            | ๑๔ นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์               |
| 10) General Electrical Engineering (GN)     | ๑๕ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า |

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

*Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)*



**พลเอก สุรยุทธ์ จุลานนท์**  
**องคมนตรี**

## สารรองคมนตรี



ทำเนียบองคมนตรี พระราชอุทยานสราญรมย์ เขตพระนคร กรุงเทพฯ ๑๐๒๐๐  
Privy Council Chambers Saranrom Palace Gardens, Pranakorn District, Bangkok 10200

### สาร

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ได้เป็นเจ้าภาพการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๐ : Electrical Engineering Network 2018 (EENET2018) ระหว่างวันที่ ๑ - ๓ พฤษภาคม ๒๕๖๑ ณ โรงแรมราชศุภมิตร อาร์.เอส.โฮเทล (R.S. Hotel) อำเภอเมืองกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นการประชุมที่มีความสำคัญทางวิชาการ เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิด และความสามารถระหว่างผู้เข้าร่วมประชุมที่มาจากทั่วประเทศ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเตรียมความพร้อมทางกำลังคน การศึกษา และภาคส่วนต่าง ๆ เพื่อรองรับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี สถาบันการศึกษาจึงเป็นองค์กรที่มีความสำคัญในการช่วยกันพัฒนาผู้เรียนทั้งด้านทักษะ และวิชาการ

งานวิจัยที่นำมาเสนอในการประชุมครั้งนี้มีส่วนสำคัญมาก เพราะสามารถนำไปถ่ายทอดให้แก่ผู้เรียน และสามารถพัฒนาเป็นงานวิจัยที่ก่อให้เกิดประโยชน์แก่สังคมต่อไป

พลเอก

(สุรยุทธ์ จุลานนท์)

องคมนตรี



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภย์ทิเชษฐ์ ฤกษ์ปริดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. อumarินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรพล จิรจรีด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สิริปรัชญานันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสิทธิ์ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร. ศุภิต งามรุ่งโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร. นุสลาพา ยะภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ราชู พันธุ์ฉลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร. สัมพันธ์ พรหมพิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจวบ ปวงราษฎร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปุณณภัทร ภูมิภาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพร เสกาศสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายชล ชูคเชื้อจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ดร. วาญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวัฒน์ คชสาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปกรณ์เกียรติ์ เสวคเมธิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนจล นาวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพพญูร์ย์ รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. นิตร์ชัย สุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ศุภวัฒน์ คำทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. นัฐ ไซดี รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1-3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 โรงแรมราชสุภมิตร อารี.เอส. โฮเต็ล (R.S. Hotel) อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี

## สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณา

ไฟฟ้ากำลัง(PW)	30	บทความ
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)	3	บทความ
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)	9	บทความ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	14	บทความ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ CP)	15	บทความ
ระบบควบคุมและการวัด (CT)	11	บทความ
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)	7	บทความ
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)	36	บทความ
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)	53	บทความ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า(GN)	41	บทความ
<b>รวม</b>	<b>219</b>	<b>บทความ</b>



## สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต	1	บทความ
มหาวิทยาลัยทักษิณ	1	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	4	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	9	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	12	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	8	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	10	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	13	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย	1	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก	4	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	13	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	10	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	16	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	8	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	10	บทความ
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	2	บทความ
มหาวิทยาลัยนครพนม	10	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ	2	บทความ



## สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน (ต่อ)

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย	2	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	4	บทความ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	13	บทความ
มหาวิทยาลัยสยาม	3	บทความ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	1	บทความ
วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี	1	บทความ
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)	1	บทความ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 4 วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี	1	บทความ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2	1	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	27	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	7	บทความ
มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม	1	บทความ
<b>รวม</b>	<b>219</b>	<b>บทความ</b>

บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง (PW)		หน้า
PW17	ผลกระทบสมรรถนะทางไฟฟ้าและอาร์มอนิกส์ที่เกิดจากการปรับลดความสว่างของจอภาพชนิดแอลซีดี ในชุดคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อการประหยัดพลังงาน <i>คณิศร บุญรัตน์</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง	60
PW18	การสร้างแบบจำลองระบบโอบริคที่มีการติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์เพื่อเพิ่มและเบคเคอร์เพื่อแก้ปัญหาความสมดุลโหลดพวัต พจนประเสริฐ ผานแดงเจริญ, ดร.ศิวทศ ศรีสมนพันธุ์ และ ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	64
PW19	การออกแบบโปรแกรมตรวจสอบสัญญาณการเกิดดิซาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 21 kV ด้วย LabVIEW <i>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิณิจ จิตจริง, ภาวินี รัตนะ, ณัฐปวิณ์ เอ็นเปรม</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	68
PW20	การออกแบบระบบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าโดยวิธีการหาลำที่เหมาะสมที่สุดหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ <i>ประสงค์ เจริญวงศ์, ผศ.ดร.กฤติเดช บัวใหญ่ และ รศ.ดร. กานท์ เกิดชื่น</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา	74
PW21	การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถไฟความเร็วสูง ในเขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย <i>ทศพร เจริญจันทร์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	78
PW22	การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของระบบการขนส่งทางรางด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติโดยใช้ โปรแกรม Dig SILENT Power Factory <i>ศฤงคาร บุญเส็ง, วรภรณ์ ลือใจ และ วาที่รื้อศรีวิกรม วงษ์เสถียร</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	82
PW23	Optimal Distributed Generation Placement and Network Reconfiguration Using Hybrid Algorithm <i>•• วังรากร ปิ่นบุรีรัตน์, Amrit Paudel และ Weerakorn Ongsakul</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	86
PW24	ผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน <i>วิศรุต อัครฉัตรสกุล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	87
PW25	การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อประเมินสภาพสายตัวนำและอุปกรณ์ประกอบของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง <i>วรภรณ์ ลือใจ,ศฤงคาร บุญเส็ง และ วรุณี ศรีสงคราม</i> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	91

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

# ผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน Effect Of Lightning On Solar Photovoltaic System On Plant

วิศรุต อัครฉัตรตฤณ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนน รังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ : 0-2549-3420 E-mail: witsarut\_a@mail.rmutt.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน โดยเป็นการจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าด้านกระแสตรง (DC) และ ระบบผลิตไฟฟ้าด้านกระแสสลับ (AC) ในสภาวะการที่ปกติเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผง Photovoltaic ( $V_{pv}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในระบบ ( $I_{pv}$ ) เปรียบเทียบกับสภาวะการที่เกิดฟ้าผ่าในระบบ จากการวิเคราะห์ค่าแรงดันและค่ากระแสของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าโดยใช้โปรแกรม PSCAD ซึ่งจำลองรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ามาตรฐานที่ 0.25/100 ไมโครวินาที โดยฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ พบว่า การเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในด้านระบบกระแสไฟฟ้าตรง (DC) และระบบกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) มีผลทำให้แรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงโดยหายไปจากระบบแสดงถึงความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น ดังนั้นการทดลองนี้จึงสามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาแนวทางการปรับปรุงอุปกรณ์ ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินช่วยไม่ให้อุปกรณ์ได้รับเสียหายรวมทั้งเป็นการสร้างเสถียรภาพของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีความมั่นคงต่อไป

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, ฟ้าผ่า, อุปกรณ์ป้องกัน

## Abstract

This article analyzes the effects of lightning strikes on ground-based solar power systems. It simulates the occurrence of lightning events in the DC and AC systems in a normal situation, comparing the effect of the voltage drop across the photovoltaic panel

( $V_{pv}$ ) and the current flowing through in system ( $I_{pv}$ ) compares the lightning situation in the system. Analysis voltage and current of solar power system. Lightning simulations using the PSCAD program, which simulates a 0.25/100 microsecond lightning waveform, are operated in a solar power system connected to a regional power distribution system at a voltage of 22 kV. It was found that the occurrence of lightning events in the solar system in both Direct Current (DC) and Alternating Current (AC) Solar power production has changed by the disappearance of the system, indicating the potential damage. Therefore, this experiment can be used as a guideline for determining the device improvement approach. In lightning protection systems, ground-based solar power systems help prevent equipment damage and stabilize the solar power system.

Keywords: Solar Power System, Lightning, Protection Equipment

## 1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในประเทศไทยซึ่งเป็นการนำมาใช้ทดพลังงานเชื้อเพลิงบางประเภทที่เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เช่น ถ่านหิน ถังธรรมชาติ น้ำมัน เป็นต้น อีกทั้งพลังงานทดแทนยังเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมและใช้ได้อย่างไม่หมดสิ้นอีกด้วย จึงเห็นได้ว่าทุกวันนี้รัฐบาลมีการประกาศนโยบายสนับสนุนด้านการลงทุนเกี่ยวกับการพลังงานทดแทนเป็นอย่างมาก เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการใช้กังหันลม เป็นต้น เมื่อการผลิตพลังงานทดแทนดังกล่าวเป็นที่สนใจและขยายวงกว้างทำให้หน่วยงานต่างๆ ทั้งในส่วนกลางภาครัฐบาล และเอกชน หันเข้ามาลงทุนในเชิงธุรกิจในการสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นเพื่อจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นในการสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพที่มั่นคงนั้นจึงเป็นสิ่งที่มีสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะ



## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศภูมิประเทศของประเทศไทยซึ่งทำให้เป็นที่นิยมและเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการสร้างระบบไฟฟ้าที่มีความมั่นคงในการขายไฟนั้นจึงเป็นสิ่งที่นักลงทุนมีความต้องการเป็นอย่างมาก แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยังคงปัจจัยด้านเหตุผลหลักสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชั่วคราวคือเหตุโดยเฉพาะ ปรากฏการณ์การฟ้าผ่าลงอุปกรณ์ในช่วงฤดูฝน เมื่ออุปกรณ์ทั้งชั่วคราวและถาวร ย่อมส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในเรื่องของสภาพการจ่ายและการรับภาระโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลานั้นเนื่องจากทั้งสองส่วนมีความเชื่อมโยงทางระบบต่อกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่า จึงเป็นแนวทางในการช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

สำหรับประเภทของผู้ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กมากหรือ VSP (Very Small Power Producer) ที่พบเห็นโดยทั่วไปในพื้นที่ภาคกลางซึ่งจะมีรูปแบบในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบ PV (Photovoltaic) โดยลักษณะการติดตั้ง PV Cell ของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่พบในพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มี 2 ระบบ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (PV Rooftop) และ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน (PV Farm) ซึ่งในบทความนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าของ ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งบนภาคพื้นดิน

## 2. ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เกิดจากการสปาร์กไฟฟ้า (Lightning is electric spark) อันเป็นผลของการเกิดดิซชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ เมื่อมีการสะสมประจุในก้อนเมฆในปริมาณมาก ส่งผลให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดิซชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นวาปฟ้าผ่า (Ground Flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็น ฟ้าแลบ (Air Discharge) แกนลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าได้ จากการวัดค่ากระแสฟ้าผ่ามีค่านับเป็นหลายสิบเป็นร้อยกิโลแอมป์ จึงกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาดั้นและรวดเร็ว ย่อมทำให้เกิดแรงกลบิตและแรงระเบิดได้มากมาย นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสฟ้าผ่ามีอัตราสูง ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเคิร์ช และแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าไปสู่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซียน ส่วนค่ากระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดิน ก็อาจเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้น อันเนื่องมาจากแรงดันช่วงฟ้าผ่าและแรงดันสัมผัสได้ [1]

## 2.1 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

การเกิดฟ้าผ่าเริ่มต้นจากก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับสูง 1.5-10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายตัวของประจุ ที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆจะเป็นประจุบวก จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุลบ คือฐานของก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤต  $E_c$  ในก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm การเกิดไอออนในชั้นของอากาศจะเกิดเป็นหัวนำร่อง มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจิ้งหรีดก้าว โดยเมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้กับพื้นโลกจะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลกที่ขั้วต่อแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออนในชั้นเป็นสกริมเมอร์เป็นลำฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่าจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุที่ดิซชาร์จซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมป์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมป์

## 2.2 ผลจากฟ้าผ่า

ผลจากฟ้าผ่าที่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายอาจแยกออกได้ 3 ประเภท คือ

2.2.1 ความร้อนเป็นผลทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่า เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าของฟ้าผ่า ลำแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตรและมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 องศาเซลเซียส กรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีรอยรอยของการถูกฟ้าผ่า ณ ตำแหน่งที่ฟ้า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะหลอมละลายได้

2.2.2 แรงกลบิตหรือแรงระเบิดเป็นผลให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทลายลงได้ โดยแรงกลบิตมีสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้แรงดันขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงหรือแรงผลักขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสอง  $I^2$  เป็นสัดส่วนกับระยะห่างระหว่างสาย ตัวนำทั้งสอง  $d$  นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำ จะคำนวณได้จากสมการนี้ แรงกลบิตที่สองเป็นแรงระเบิดเนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมากทำให้อากาศรอบๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็วเป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายออกไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าผ่านั่นเอง

2.2.3 ผลทางไฟฟ้า เกิดแรงดันเกินในระบบสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลเสียแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสาร เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเกิดแรงดันช่วงฟ้าผ่าเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต [2]



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

*Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)*

**2.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่า**

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการร่างมาตรฐานป้องกันฟ้าผ่าโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย คือ วสท. 2003-43 ร่างตามแนวมาตรฐาน IEC 61024-1-2 ซึ่งได้แนะนำวิธีติดตั้งตัวนำล่อฟ้าแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ วิธีมุมป้องกัน วิธีทรงกลมกลิ้ง และวิธีตาข่าย

อาคารและสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในที่แจ้งนั้นมีอัตราเสี่ยงต่อการถูกฟ้าผ่าสูง จึงควรมีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เรียกว่า ระบบสายล่อฟ้า ซึ่งเป็นระบบที่ล่อให้ฟ้าผ่าลง ณ จุดที่กำหนดให้ฟ้า หากจะเกิดฟ้าผ่าขึ้นในบริเวณนั้น แล้วมีทางให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ความมา วิธีป้องกันฟ้าผ่าแก่อาคารสิ่งปลูกสร้าง นิยมใช้ระบบป้องกันแบบพาราเดย์ ที่ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ตัวนำล่อฟ้า สายตัวนำลงดิน และรากสายดิน

**2.4 ระดับป้องกันฟ้าผ่า (LPL)**

ตามมาตรฐาน วสท. EIT Standard 2007-53 ได้มีการกำหนดระดับป้องกันฟ้าผ่าออกเป็น 4 ระดับ โดยที่ค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำแรก และค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำต่อมา ซึ่งมีค่าสูงสุดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระแสฟ้าผ่าของค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำแรก และกระแสฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำต่อมา

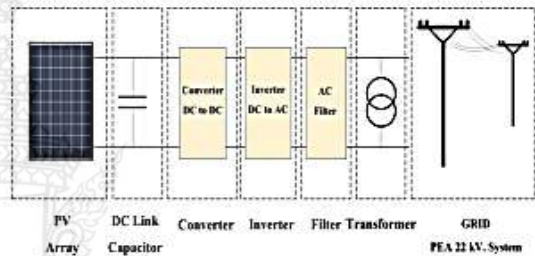
ค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำแรก			ระดับป้องกันฟ้าผ่า			
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระแสฟ้าผ่า	สัญลักษณ์	หน่วย	1	2	3	4
กระแสช็อค	$I$	kA	200	150	100	50
ประจุของค่าฟ้าผ่าช่วงสั้น	$Q_{short}$	C	100	75	50	25
พลังงานจำเพาะ	$W/R$	MJ/M	10	5.6	2.5	1.25
พารามิเตอร์ทางเวลา	$T1/T2$	$\mu s/\mu s$	10/350			
ค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำต่อมา			ระดับป้องกันฟ้าผ่า			
กระแสช็อค	$I$	kA	1	2	3	4
ความชันเฉลี่ย	$di/dt$	kA/ $\mu s$	50	37.5	25	12.5
พารามิเตอร์ทางเวลา	$T1/T2$	$\mu s/\mu s$	200	150	100	50

**3. ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์**

ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นแหล่งพลังงานที่ปราศจากมลพิษ เป็นระบบพลังงานที่นำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เช่น ก๊าซ น้ำมัน ถ่านหิน เป็นต้น สำหรับในพื้นที่ของประเทศไทยเกือบทั้งหมดสามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 4.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ดังนั้นในพื้นที่

1 ตารางกิโลเมตร สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า พื้นที่ประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.3% ของประเทศ ปัจจุบันการผลิตพลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมอย่างมากโดยที่พบเห็นทั่วไป มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ โซลาร์ฟาร์ม และ โซลาร์รูฟท็อป

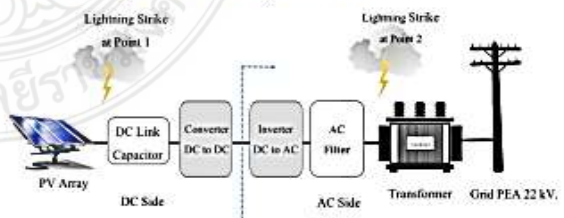
หลักการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการรับไฟฟ้ากระแสตรงผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับเพื่อป้อนให้กับโหลดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับหรือต้นปั่น โหลดไฟฟ้ากระแสตรงก็มีอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เพื่อช่วยรักษาระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพในการจ่ายไฟ ซึ่งในบทความนี้ได้มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินแห่งหนึ่ง ในจังหวัดสระบุรีมาใช้ในการวิเคราะห์ผล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 [4-5]



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

**4. แบบจำลองการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และผลการทดสอบ**

พารามิเตอร์ของฟ้าผ่าได้เลือกใช้ค่าฟ้าผ่าช่วงสั้นต่ำแรก ที่ค่ากระแสช็อค เท่ากับ 200 kA พารามิเตอร์ทางเวลา T1/T2 เท่ากับ 10/350  $\mu s$  ตามมาตรฐาน วสท. EIT Standard 2007-53 โดยมีการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ 2 จุด คือ ในส่วนของด้าน DC และด้าน AC ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับระบบ ในสภาวะปกติ โดยการวิเคราะห์จากภาพกราฟของแรงดัน ( $V_p$ ) และ ค่ากระแส ( $I_p$ ) ของระบบ

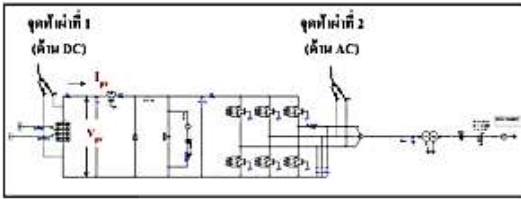


รูปที่ 2 บริเวณจุดจำลองการเกิดฟ้าผ่าด้าน DC และ AC

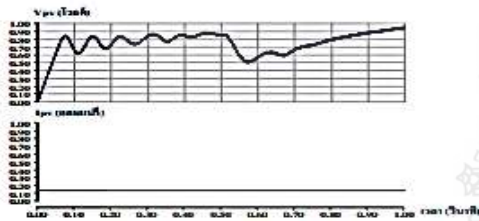
## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

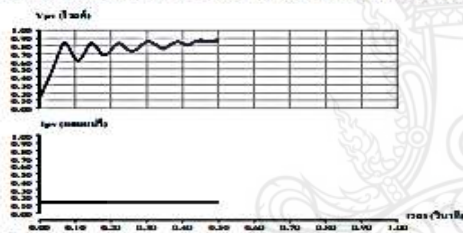


รูปที่ 3 จำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม PSCAD



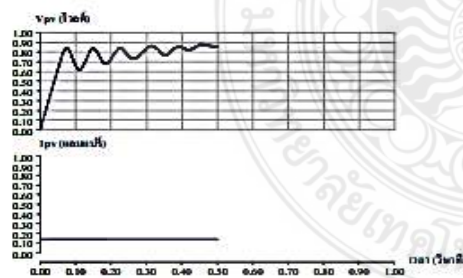
รูปที่ 4 ผลการทดลองในสภาวะปกติ

จากกราฟในรูปที่ 4 ในสภาวะที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีความปกติ ค่าแรงดัน และ กระแส จะมีการผลิตพลังงานออกมาอย่าง



ต่อเนื่อง

รูปที่ 5 ผลการทดลองกรณีเกิดฟ้าผ่าด้าน DC



รูปที่ 6 ผลการทดลองกรณีเกิดฟ้าผ่าด้าน AC

จากรูปที่ 5 และ 6 เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ถูกการรบกวน จากการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบจะทำให้ค่าแรงดัน และกระแส ในระบบขาดความต่อเนื่องของการผลิตค่าพลังงานไฟฟ้า

## 5. สรุป

จากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตพลังงานไฟฟ้าปกติ แสดงในรูปที่ 4 เมื่อทำการพิจารณาการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้า กระแสตรง ด้าน DC จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_{pu}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{pu}$ ) หายออกไปจากระบบ แสดงในรูปที่ 5 เช่นเดียวกับการจำลอง เหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าในด้าน AC ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 200 kA ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_{pu}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{pu}$ ) หายออกไปจากระบบ เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิต ไฟฟ้าพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ ในบริเวณจุดใดก็ตามย่อมส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทั้งระบบทำให้ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา ได้ ดังนั้นในการหาแนวทางการป้องกันฟ้าผ่าควรเลือกใช้อุปกรณ์ ที่เหมาะสมรวมทั้งมีคุณสมบัติครอบคลุมที่ลดค่ากระแสไฟฟ้าค่าต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ วิทยาลัย โทมศึกษาเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนในการเขียนบทความ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรวจ สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 1, 2547 (น. 9-1-9-19).
- [2] บุญเลิศ โขประดิษฐ์, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์, และธนพงศ์ สุวรรณศรี, "การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่ง ปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน", การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (น. 251-254). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยกรุงเทพและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ.
- [3] คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, "มาตรฐานการป้องกัน ฟ้าผ่า ภาคที่ 1 ข้อกำหนดทั่วไป", พิมพ์ครั้งที่ 3, 2557 (น. 8-1-8-9).
- [4] N.H Zaini, M. Z. A. Ab-Kadir, M. Izadi, N.I. Ahmad, M.A.M Radzi and N. Azis, W.Z. Wan Hansan, "On the Effect of Lightning on a Solar Photovoltaic System," *International Conference on Lightning Protection, 2016*, pp. 1-4.
- [5] A.W. Peabody, "Control of Pipeline Corrosion", Second Edition 2001 by NACE International, pp.30.





**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10**  
**The 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET2018)**

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า  
**วิศรุต อัครฉัตรสกุล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์**  
 ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง

**ผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน**

ระหว่างวันที่ 1-3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561  
 ณ โรงแรมราชศุภมิตร-อาร์.เอส.ไฮเต็ล (R.S.Hotel) จังหวัดกาญจนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ ชัยรัตน์  
 ประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ ชัยรัตน์  
 ศึกษาราชการแทนอธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



**SPU**  
SRIPATUM  
UNIVERSITY



## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๑ The 41<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-41)

วันที่ ๒๑ - ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๑

โรงแรมสุณีย์ แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี  
เจ้าภาพจัดงาน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

### รวมบทความ

#### Volume 1

ไฟฟ้ากำลัง  
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
ระบบควบคุมและการวัดคุม  
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล  
ไฟโตนิคส์

#### Volume 2

ไฟฟ้าสื่อสาร  
อิเล็กทรอนิกส์  
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ  
วิศวกรรมชีวการแพทย์  
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า







### สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีความยินดีและภาคภูมิใจเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพร่วมกับ มหาวิทยาลัยศรีปทุมในการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference) ครั้งที่ 41 (EECON-41) ภายใต้แนวคิด “วิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรม” ในระหว่างวันที่ 21-23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ณ โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นการประชุมทางวิชาการระดับชาติที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ คณาจารย์ นิสิต นักศึกษา นักวิจัย รวมถึงวิศวกรและผู้ปฏิบัติงานในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาอื่น ๆ ที่ เกี่ยวข้องจากสถาบันการศึกษาและหน่วยงานต่าง ๆ ได้นำเสนอผลงานวิจัยและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางด้าน งานวิจัยระหว่างกัน ก่อให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมทางวิศวกรรมไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน ด้านอุตสาหกรรมและด้านอื่น ๆ เพื่อการพัฒนาประเทศให้มีความเจริญก้าวหน้าต่อไป

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดงาน ผู้สนับสนุนการจัดงาน ที่ได้ร่วมกันจัดการประชุมในครั้งนี้ ขอให้การประชุมในครั้งนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นงนิตย์ ธีระวัฒนสุข)

อธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ในนามของผู้บริหารและบุคลากรมหาวิทยาลัยศรีปทุม รู้สึกเป็นเกียรติและภาคภูมิใจอย่างยิ่ง ที่ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพร่วมกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 41 ซึ่งเป็นการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าระดับชาติที่เก่าแก่ที่สุดของประเทศ และแสดงให้เห็นว่าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีศักยภาพทางวิชาการเป็นที่ยอมรับของสถาบันการศึกษาและหน่วยงานชั้นนำของประเทศ และยังเป็นกรณีฉลองเนื่องในโอกาสที่ภาควิชา ครบรอบ 30 ปี ในปี 2561

ในโอกาสนี้ ดิฉันหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลจากการประชุมนี้จะเป็นอีกก้าวหนึ่งที่เปิดโอกาสให้กับ นิสิต นักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ ตลอดจนผู้สนใจทั่วไป ได้นำเสนอผลงาน เผยแพร่งานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และประสบการณ์ในการทำวิจัย เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศและต่อยอดการใช้ประโยชน์ในการพัฒนาการเรียนการสอน การวิจัยพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ๆ ในศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า และเป็นเครือข่ายในการพัฒนาทางวิชาการ สำหรับแก้ปัญหาในระดับประเทศต่อไป

สุดท้ายนี้ขอให้การจัดประชุมครั้งที่ 41 นี้ ประสบความสำเร็จนำมาซึ่งประโยชน์แก่ประเทศชาติ บรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ และขออวยพรให้คณะผู้จัดการประชุม ผู้เข้าร่วมการประชุม รวมถึงผู้สนับสนุนทุกท่าน ประสบความสุข ความเจริญ และความสำเร็จในสิ่งอันพึงปรารถนาทุกประการ

(ดร.รัชনীพร พุกยากรณ์ พุกกะมาน)

อธิการบดี มหาวิทยาลัยศรีปทุม

**ประธาน**

ผศ.ดร.วรการ	วงศ์สายเชื้อ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.ภรชัย	จูอนุวัฒน์กุล	มหาวิทยาลัยศรีปทุม

**กรรมการสามัญ**

อ.บุญช่วย	ทรัพย์มนชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ศิริโรจน์	ศิริสุขประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.นันทิยา	ชัยบุตร	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ.ดร.ชาติ	ฤทธิทธิรัฐ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.นรารัตน์	เรืองชัยจตุพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ยศนัย	ศรีอุทัยศิริวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ไกรสร	ไชยขาววงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.เอกชัย	มูจกลิ่นทวีมูติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมมาตร	แสงเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.มนตรี	วิบูลย์รัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อ.ดร.สุพรรณ	ทิพย์ทิพากร	มหาวิทยาลัยมหิดล
อ.ดร.สุพัฒนา	นริศขนาภรณ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.กภาพล	วรดิษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.วันชัย	จันไกรผล	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อ.ดร.มงคล	แซ่เจีย	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.ยงยุทธ	นาราชภูร์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วันชัย	ฉิมฉวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
รศ.ดร.บุญเลิศ	สื่อเฉย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.สาคร	วุฒิปัทฒนพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.ภักดิ์วัฒน์	จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อ.ดร.ยุทธนา	จงเจริญ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.มุขิตา	สงฆ์จันทร์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ปฏิภาณ	เกิดลาภ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
ผศ.ดร.วรการ	วงศ์สายเชื้อ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สิรินทร์	อินทร์สวาท	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
อ.ณรงค์	นันทกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วุฒิวัฒน์	คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รศ.ดร.เชวศักดิ์ รักเป็นไทย  
รศ.ดร.กาญจน์ เกิดชื่น  
รศ.ดร.กীরติ ชยะกุลศิริ  
อ.ดร.ทัศนีย์ ภาธรรัตน์  
ผศ.ดร.กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์

มหาวิทยาลัยพะเยา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

**กรรมการสมทบ**

อ.ดร.ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

**เลขานุการ**

ผศ.วันชัย จันไกรผล

มหาวิทยาลัยศรีปทุม







ไฟฟ้ากำลัง Electrical Power System (PW)	27 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics (PE)	28 บทความ
ไฟฟ้าสื่อสาร Communication (CM)	15 บทความ
ระบบควบคุมและการวัดคุม Control system and Instrument Technology (CT)	11 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์ Electronics (EL)	7 บทความ
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล Digital Signal Processing (DS)	6 บทความ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ Computer and Information Technology (CP)	12 บทความ
โฟโตนิกส์ Photonics (PH)	2 บทความ
วิศวกรรมชีวการแพทย์ Bio-Electronics (BE)	6 บทความ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า General Research Related to Electrical Engineering (GN)	32 บทความ
รวม	146 บทความ

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IPW01	การวิเคราะห์ปัจจัยการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	1
IPW02	Review of Wind Turbine Technologies and Combined Scheme for DFIG FRT Capability	5
PW01	การประมาณการลดการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในอาคารสำนักงานภายในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยการปรับอุณหภูมิภายในอาคาร	11
PW02	การศึกษาผลกระทบต่อร์ดับแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบลดโดยสารไฟฟ้าแบบโทรลลีส้อย่าง	15
PW03	ระบบติดตามตรวจอาทิตย์แบบหนึ่งแกนสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์	19
PW04	การศึกษาเสถียรภาพแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์	23
PW05	ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน ณ เกาะห้อง	27
PW06	แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินกรณีฟ้าผ่าทางตรง	31
PW07	การประมาณรัศมีดักฟ้าผ่าสมมูลและวิเคราะห์จำนวนการเกิดฟ้าผ่าต่อปีของแห่งตัวนำล่อฟ้าแนวตั้ง	35
PW08	การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าผ่านอุตสาหกรรม ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์	39
PW09	การทดสอบหาแรงดันเบรกดาว์นของแก๊สอากาศทรงกลม – ระนาบ	43
PW10	Ground Electrode Resistance Calculation Using Finite Element Method	48
PW11	ผลกระทบจากการต่อลงดินต่อแรงดันปลอกโลหะของสายเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์	53
PW12	การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า กรณีศึกษานหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	57
PW13	การคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส	61
PW14	การวิเคราะห์ผลกระทบของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเทคนิคการตอบสนองของคลื่นของหม้อแปลงไฟฟ้า	65
PW15	ผลกระทบความผิดพลาดของนิกรวมต่อก๊าซผิดพร้อมในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	69
PW16	การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าอย่างประหยัดที่เหมาะสมที่สุดด้วยการปรับปรุงขั้นตอนวิธีปัลลาพ	73
PW17	การปรับปรุงขั้นตอนวิธีการคำนวณการไหลด้วยวิธีนิวตันราฟสันโดยพิจารณาโหนดมอดเดอร์เหนี่ยวนำแบบกรงคู่	77
PW18	Application of Multi-Verse Optimizer for Optimal Placement and Size of Distributed Generation in Radial Distribution Networks	81
PW19	การวางแผนขยายสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบหลายขั้นตอน	85
PW20	Optimal Power Flow Considering Price-Based Real-Time Demand Response	89
PW21	การประมาณสถานะแอลเอวีที่ไม่มีกรวัดอิทธิพลสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ที่เอมยู	93
PW22	Impacts of Low Inertia on Frequency Stability Transmission Systems with High PV Penetration	97
PW23	การประเมินศักยภาพต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะผสมกากมะพร้าวและโยปาล์มในชุมชนโดยใช้เทคโนโลยีความร้อนไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน	101
PW24	การศึกษาผลกระทบของการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	105

แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินกรณีฟ้าผ่าทางตรง

Design of Lightning Protection for On-Ground Solar Farm : Direct Lightning Stroke Case

วิศรุต ชัยสวัสดิ์สกุล และ คุณณัฏชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนน รังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12100

โทรศัพท์ : 0-2549-3420 E-mail: witsarut\_u@mail.rmutt.ac.th

PW06

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดิน ซึ่งการเกิดฟ้าผ่าสามารถผ่าลงที่วัตถุโดยตรงหรือที่เรียกว่าฟ้าผ่าทางตรง และการเกิดฟ้าผ่าลงบนบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงแต่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเรียกว่าฟ้าผ่าทางอ้อม บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบในกรณีของการเกิดฟ้าผ่าทางตรงของระบบที่มีการติดตั้งและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้รูปคลื่นฟ้าผ่าทางตรง ขนาด 10/350  $\mu$ s ระดับค่าที่กดกระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA, 40 kA และ 60 kA โดยใช้โปรแกรม PSCAD จำลองการทำงาน ผลการจำลองสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางวิเคราะห์และออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินได้

**คำสำคัญ:** ฟ้าผ่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ป้องกันฟ้าผ่า

**Abstract**

This article analyzes the effects of lightning strikes on ground-based solar power systems. In lightning, it can directly be stroke at the object, also known as direct and indirect lightning. This article also analyzes and compares the effects of direct lightning strikes with and without install Surge Arrester using wave form at 10/350  $\mu$ s, lightning current rating of 20 kA, 40 kA and 60 kA by using PSCAD program environment. This research can be verified as a guideline for analyzing and issuing lightning protection systems in the solar power system based on the ground installation.

**Keywords:** Lightning, System for solar power generation, Lightning protection

**1. บทนำ**

ปัจจุบันประเทศไทยมีการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตพลังงานทดแทนเนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายที่จะลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว จึงทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เข้ามามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก

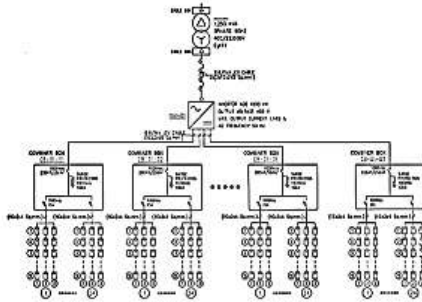
สำหรับในพื้นที่ภาคกลางแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมมากและเนื่องจากนโยบายของรัฐบาลที่มีการสนับสนุนเกี่ยวกับการลงทุนธุรกิจด้านการใช้พลังงานทดแทนนั้น จึงทำให้เป็นที่สนใจของภาคประชาชนและนักธุรกิจในภาคอุตสาหกรรมที่หันมาคิดถึงการใช้จ่ายเงินลงทุนเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอัตราค่าไฟฟ้าหรือเพื่อการจัดหาหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อมองในด้านปัญหาของการเกิดฟ้าผ่าลงแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงฤดูฝนนั้นนับได้ว่ายังเป็นปัญหาที่ยังเกิดขึ้นได้บ่อยในประเทศไทยมีลักษณะของฟ้าผ่าแบบจั่วลบที่ค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA [1] ส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบการผลิตเกิดความเสียหายทำกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงหรือไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เลย ดังนั้นในงานบทความนี้จึงเป็นการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์ผลของค่ากระแสฟ้าผ่า และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการใช้ข้อมูลการศึกษาจากบริษัท Z ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี สำหรับเหตุการณ์ฟ้าผ่าในจังหวัดสระบุรี ได้รวบรวมข้อมูลไว้โดยศูนย์ภูมิภาค ทรูเนชั่นวิทยา [2]

**2. ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์**

**2.1 กระบวนการสร้าง**

บทความนี้ได้กำหนดขอบเขตของการทำศึกษาโดยเลือกจำลองกรณีการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของแผงโซลาร์เซลล์ในกลุ่มของอินเวอร์เตอร์ที่ 1 ซึ่งเป็นแผงโซลาร์เซลล์ ชนิด Thin Film มีอัตราผลิตกำลังไฟฟ้าขนาด 125 W จำนวน 8,064 แผง การจัดเรียงของแผง 16 Module/ String อัตรากำลังผลิต 2,000 W/String ดังแสดงในรูปที่ 1





รูปที่ 1 แบบแผนผังทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากนั้นนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองของแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม PSCAD โดยในกำหนดข้อมูลในแต่ละ Section ของ PV Model จะประกอบด้วยแผง PV จำนวน 16 Module 72 String รวม 1,152 แผง

## 2.1 แผงโซลาร์เซลล์ (PV Array)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนหรือชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell) ซึ่งมีการจัดเรียงของแผงโซลาร์เซลล์ โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ได้การทดสอบของผลของค่าของกระแสลัดวงจร (Short-circuit current) ค่าแรงดันเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage) คำนวณมาจากสมการที่ (1) และ สมการที่ (2)

$$I_{sc} = (3.37/1,000) \times 72 \text{ PV String} = 0.24 \text{ kA} \quad (1)$$

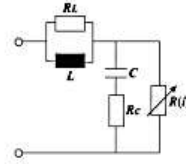
$$V_{oc} = (955.2/1,000) = 0.9552 \text{ kV} \quad (2)$$

## 2.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการที่ใช้ในกรณีศึกษา เป็นอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ (Central Inverter) ผลิตภัณฑ์ของ ABB รุ่น PVS800-57-1,000KW-C ขนาด 3 เฟส 400 V ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีผลการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส แบบวงจรเบร็ด ประกอบด้วย 6 IGBT [3]

## 2.3 กักเก็บฟ้าผ่า (Lightning Arresters)

บทความนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์กักเก็บฟ้าผ่าที่ป้องกันในฉนวนไฟฟ้ากระแสตรง และ ฉนวนกระแสสลับที่ติดตั้งป้องกันกระแสฟ้าผ่า ขนาด 40 kA ซึ่งการออกแบบวงจรอุปกรณ์กักเก็บฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) [4]

## 2.4 การสร้างแบบจำลองอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่า

กรณีฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Stroke) ได้ใช้สมการหาค่ากระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลาตามมาตรฐานของ IEC62305-1 ดังสมการที่ (3)

$$I(t) = -\frac{I}{k} \frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)} \times \exp(-t/T_2) \quad (3)$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 0.25/100  $\mu\text{s}$  เลือกใช้ค่า  $k = 0.993$ ,  $T_1 = 0.45 \mu\text{s}$  และ  $T_2 = 143 \mu\text{s}$  แทนในสมการที่ (4)

$$I(t) = \frac{I}{0.993} \times \frac{(t/0.45 \mu\text{s})^{10}}{1+(t/0.45 \mu\text{s})} \times \exp(-t/143 \mu\text{s}) \quad (4)$$

รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 10/350  $\mu\text{s}$  เลือกใช้ค่า  $k = 0.93$ ,  $T_1 = 19 \mu\text{s}$   $T_2 = 485 \mu\text{s}$  แทนในสมการที่ (5)

$$I(t) = \frac{I}{0.993} \times \frac{(t/0.93 \mu\text{s})^{10}}{1+(t/0.93 \mu\text{s})} \times \exp(-t/485 \mu\text{s}) \quad (5)$$

กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Stroke) เลือกใช้รูปแบบ Wave form ของกระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลา ดังสมการที่ (6)

$$I(t) = A e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (6)$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 8/20  $\mu\text{s}$  เลือกใช้ค่า  $A = 2.1501$ ,  $\alpha = 6.05 \times 10^4 \mu\text{s}$  และ  $\omega = 16.75 \text{ kHz}$  แทนในสมการที่ (7)

$$I(t) = 2.1501 e^{-6.25 \times 10^4 t} \sin 16.75 t \quad (7)$$

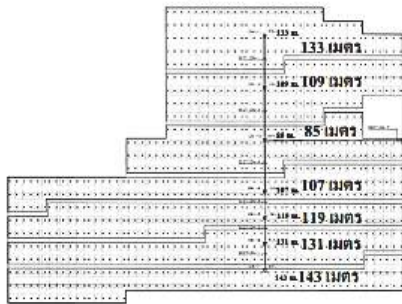
## 2.5 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Line Resistance)

จากข้อมูลของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษพบว่าสายไฟที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตู้ Combinerbox ถึง Inverter มีลักษณะเป็นสายตัวนำทองแดงเดินร้อยท่อสังเค็ดที่อุณหภูมิ 25 °C ชนิดของสาย 0.6/1kV XLPE (Cross - linked polyethylene) ขนาด 1C X 2 X 95 sq.mm เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำขนาด 11.4 mm. ดังนั้นการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายไฟที่ในระยะความยาวสายในจุดต่อต่างๆ [5] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$R_T = R_{T0} \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (8)$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานของสายไฟที่ตามความระยะสายในจุดต่างๆ

จากสมการดังกล่าวสามารถคำนวณค่าความต้านทานสายไฟได้ในระยะที่ความยาวสาย แสดงในรูปที่ 4

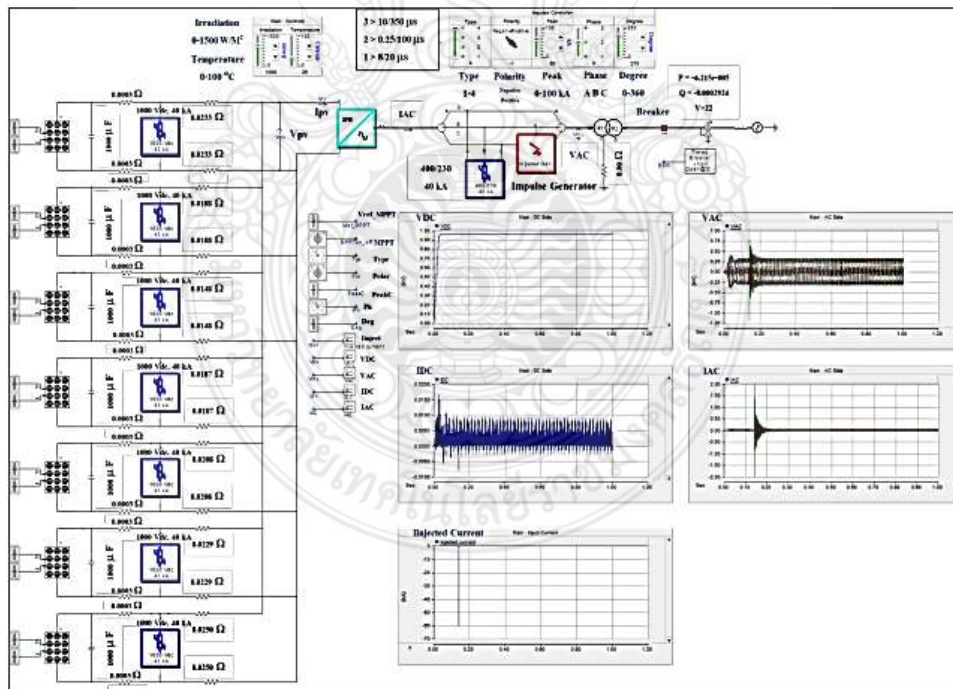


ความต้านทานสายไฟ	ระยะสาย (เมตร)	R ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	R ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
R1	133	0.0229	0.0233
R2	109	0.0188	0.0188
R3	85	0.0146	0.0148
R4	107	0.0184	0.0187
R5	119	0.0205	0.0208
R6	131	0.0255	0.0229
R7	143	0.0246	0.0250
R8-R14	2	0.0069	0.0003
R15	-	0	0

รูปที่ 4 ระยะความยาวสายไฟจาก PV ถึง Power Home

เมื่อคำนวณค่าความต้านทานสายไฟจาก ตู้ Combinerbox ถึง Inverter (R1-R7) จาก แผงโซลาร์เซลล์ ถึง Surge Arrester (R8-R14) และความต้านทานของหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA (R15) แสดงค่าในตารางที่ 1

จากนั้นนำส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ และค่าที่ได้จากการคำนวณ มาสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PSCAD ดังแสดงในรูปที่ 5

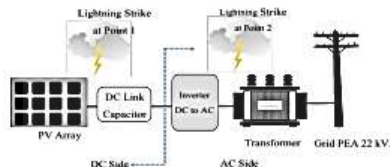


รูปที่ 5 การสร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PS-CAD



3. การทดลอง

บทความได้จำลองการเกิดเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าลงในสายไฟฟ้า ในบริเวณ 1 จุด คือ จุดที่ 2 บริเวณสายไฟฟ้าด้าน DC อยู่ช่วงสายไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ ถึง อินเวอร์เตอร์ และ จุดที่ 2 ด้าน AC บริเวณสายไฟฟ้าส B ก่อนเข้าหม้อแปลง ในลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าทางตรงรูปคลื่น 10/350  $\mu$ s ที่ขนาดค่ากระแสฟ้าผ่า 20, 40 และ 60 กิโลแอมป์ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองตำแหน่งการเกิดฟ้าผ่าด้าน DC และ AC

3.1 กรณีฟ้าผ่าด้าน DC

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดกรณีฟ้าผ่าด้าน DC

I <sub>imp</sub> (kA)	ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า				มีระบบป้องกันฟ้าผ่า			
	DC		AC		DC		AC	
	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)
20	0.83	-5.12	3.24	-10.43	0.84	-0.22	0.41	-0.12
40	0.70	-11.52	6.28	-20.85	0.72	-0.24	0.41	-0.13
60	0.57	-18.27	9.32	-31.26	0.59	-0.28	0.41	-0.14

จากตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน DC

3.2 กรณีฟ้าผ่าด้าน AC

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดกรณีฟ้าผ่าด้าน AC

I <sub>imp</sub> (kA)	ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า				มีระบบป้องกันฟ้าผ่า			
	DC		AC		DC		AC	
	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)	V <sub>max</sub> (kV)	I <sub>max</sub> (kA)
20	0.96	0.02	9.37	19.89	0.96	0.01	-0.97	16.91
40	0.96	0.04	18.57	39.78	0.96	0.01	-1.09	26.35
60	0.96	0.06	27.99	59.67	0.96	0.01	-1.19	32.08

จากตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน AC

4. อภิปราย

เมื่อเกิดเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน DC จุดที่ บริเวณสายส่งช่วงหลังแผงโซลาร์เซลล์ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ในกรณีก่อนและหลังการติดตั้ง

อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V<sub>max</sub> ในระบบ DC มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากการขาดเซอค่าของคลื่น จากอุปกรณ์กัปปาซิเตอร์ขนาด 10,000  $\mu$ F ติดตั้งอยู่ในระบบทำให้มีการชดเชยแรงดันที่เข้ามาในระบบ ในส่วนของค่าแรงดันในระบบ AC ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าพบว่ามีความลดลง เมื่อพิจารณาในของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ I<sub>max</sub> ในส่วนของระบบ DC มีค่าลดลง และในส่วนของ AC มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน สำหรับกรณีที่เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน AC บริเวณจุดที่ 2 บริเวณช่วงสายส่งก่อนเข้าหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA ในกรณีก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V<sub>max</sub> ในระบบ DC ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง และในส่วนของระบบ AC มีค่าลดลง เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าสูงสุด I<sub>max</sub> ในระบบ DC พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและในระบบ AC พบว่ามีค่าลดน้อยลง

5. สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน DC พบว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบ AC ในกรณีที่ไม่มียุติการป้องกันฟ้าผ่าที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 20 kA, 40 kA และ 60 kA มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.24 kV, 6.28 kV และ 9.32 kV ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังจากที่ใส่ อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลงเหลือ 0.41 kV และในกรณีจำลองจากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน AC พบว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบ AC มีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 9.37 kV, 18.57 kV และ 27.99 kV ตามลำดับ เมื่อใส่ อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลง -0.97 kV, -1.09 kV และ -1.19 kV ตามลำดับ เนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าลงสายไฟแรงดันสูงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกระจายไปในทุกทิศทางตามแนวสายไฟของระบบจึงทำให้การป้องกันอุปกรณ์ชั่วคราวโดยใช้กับดักฟ้าผ่าอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ดังนั้นในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรพิจารณาการติดตั้งเสาต่อฟ้าในตำแหน่งการป้องกันที่เหมาะสมเพื่อเป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าลง อุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] นนทยา กล้ายธิธอง และคณะ, "การปรับปรุงสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 kV," การประชุมทวิวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ครั้งที่ 48, กรุงเทพมหานคร, 3-5 กุมภาพันธ์ 2533, หน้า 421-428.
- [2] ศูนย์ภูมิภาค กรมอุตุนิยมวิทยา, รายงานภัยธรรมชาติในประเทศไทย, เก็บถาวรได้จาก <http://climate.tmd.go.th/disaster/content>
- [3] N.H Zaini, et al, "On the Effect of Lightning on a Solar Photovoltaic System," International Conference on Lightning Protection, 2016, pp. 1-4.
- [4] Valdemir S. Brito, et al, "A wide-range model for metal-oxide surge arrester," IEEE Transactions on power delivery, 2018, pp. 102-109
- [5] ธนัชชัช ฤกษ์วานิชพงษ์, "ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า" พิมพ์ครั้งที่ 1, อัดสำเนา, 2549, (น.40-42)





**SPU**  
SRIPATUM  
UNIVERSITY



# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๑ (EECON-41)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ระหว่างวันที่ ๒๑ - ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๑

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

**วิศรุต อัจฉริยะสกุล**

ได้เสนอบทความวิจัยเรื่อง

แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินกรณีฟ้าผ่าทางตรง



*(Handwritten signature)*

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรการ วงศ์สายเชื้อ)  
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

๑๖

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรชัย จูอนุวัฒน์กุล)  
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

*(Handwritten signature)*

(รองศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษ์บุตร)  
นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวิศรุต อัครฉัตรสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	13 มิถุนายน 2528
ที่อยู่	2/3 หมู่ 5 ตำบลโรง อำเภอนองแคว จังหวัดสระบุรี 18140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาปี 2550 สำเร็จการศึกษาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สำเร็จการศึกษาปี 2556
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกร ระดับ 6 แผนกมิเตอร์ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอนองแคว จังหวัดสระบุรี
อีเมล	witsarut_a@mail.rmutt.ac.th

