

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและกระแสไอออนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยพิจารณาพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมของประเทศไทย

แคทรียา ชูพุ่ม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Electrical and Electronics Commons](#)

Recommended Citation

ชูพุ่ม, แคทรียา, "การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและกระแสไอออนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงโดยพิจารณาพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมของประเทศไทย" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6555.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6555>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและกระแสไอออนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงโดยพิจารณา
พารามิเตอร์สภาพแวดล้อมของประเทศไทย



นางแคทรียา ชูฟุ่ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD AND ION CURRENT OF HVDC TRANSMISSION LINES
CONSIDERING ENVIRONMENTAL PARAMETERS
OF THAILAND



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและกระแสไอออนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงโดยพิจารณาพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมของประเทศไทย
โดย	นางแคทรียา ชูพุ่ม
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีจิตรประภา)

แควพรียา ชูพุ่ม : การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและกระแสไอออนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
 กระแสตรงโดยพิจารณาพารามิเตอร์สภาพแวดล้อมของประเทศไทย. (ANALYSIS OF
 THE ELECTRIC FIELD AND ION CURRENT OF HVDC TRANSMISSION LINES
 CONSIDERING ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF THAILAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
 ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

วิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไอออนของสายส่ง
 ไฟฟ้ากระแสตรง (HVDC) แบบพาดในอากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์วอลุ่ม. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์
 คือ การประยุกต์ใช้ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับการจำลองการไหลของประจุในอากาศ และ
 วิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากการติดตั้งสายลวด สสภาพแวดล้อมของลมและอุณหภูมิ. ผลการ
 จำลองของสายส่ง 70 kV HVDC แบบขั้วเดียว มีแนวโน้มคล้ายกันกับผลการวัดความหนาแน่น
 กระแสไอออนในกรณีไม่มีและมีสายลวด. การเพิ่มจำนวนสายลวดที่มีระยะติดตั้งอย่างเหมาะสม
 ลดค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไอออนที่พื้นดินได้มากกว่า 50%. ผลการจำลองของสายส่ง
 ± 500 kV HVDC แบบขั้วคู่สองวงจรใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าและ
 ความหนาแน่นของกระแสไอออนภายในเขตเดินสายเดียวกันกับสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ (HVAC).
 การใช้สายตัวนำไฟฟ้าทางเดินไหลกลับที่เฟสล่างช่วยลดค่าสูงสุดที่พื้นดินของความหนาแน่นกระแส
 ไอออนและสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 63% และ 25% ตามลำดับ. ผลลัพธ์ของข้อมูลลมในจังหวัด
 ขอนแก่นแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นกระแสไอออนและสนามไฟฟ้าสูงขึ้นตามความเร็วลมและ
 สัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนที่เพิ่มขึ้น. ข้อจำกัดของสายส่ง ± 500 kV HVDC คือ ความเร็วลมที่ความสูง
 อ้างอิงและสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนควรมีค่า 1.6 m/s และ 0.4 ตามลำดับ จึงได้ค่าสูงสุดของ
 สนามไฟฟ้าต่ำกว่าสายส่ง 500 kV HVAC. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสายตัวนำ 1272 MCM ทำให้
 ความหนาแน่นกระแสไอออนเพิ่มขึ้นและค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าอาจมากกว่าสายส่ง 500 kV
 HVAC ได้ถึง 38%. ข้อมูลสถิติของลมและอุณหภูมิจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับสภาพแวดล้อม
 ทางไฟฟ้าที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบสายส่ง HVDC ใช้งาน.

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6273007921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: high voltage direct current transmission lines, electric field, ion current density, underbuilt shield wires, wind, temperature, finite volume method

Cattareya Choopum : ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD AND ION CURRENT OF HVDC TRANSMISSION LINES CONSIDERING ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF THAILAND. Advisor: Prof. Dr. Boonchai Techaumnat

This thesis presents the analysis of electric field and ion current density for the high voltage direct current (HVDC) overhead transmission lines by using the finite volume method. The objectives are to apply the computer fluid dynamic into the ion flow field simulation and to analyze the effects of shield wire, wind and temperature. For the 70 kV HVDC monopolar lines, the simulated and measured ion current density have a similar tendency. Increasing the number of underbuilt shield wires with suitable spaces can reduce the ground ion current density by more than 50%. The ± 500 kV HVDC simulations are used to investigate the change in electric field and ion current density within the existing HVAC corridors. The dedicated metallic return conductors can reduce the peak of ion current density and electric field approximately by 63% and 25%, respectively. The Khon Kaen wind data shows that the peak magnitudes are higher when increasing wind velocity and shear coefficient. The restrictions for the HVDC lines are the wind velocity at a reference height and shear coefficient being 1.6 m/s and 0.4, respectively. Increasing temperature of 1272 MCM conductors results the higher ion current density and the peak electric field can be 38% higher than the HVAC lines. The wind and temperature data are therefore the important parameters for the HVDC environment needed to consider in the design.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันต์ เพ็ชรรักษ์ ที่ให้โอกาสและแนะนำการเข้ามาศึกษาต่อ. ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณถาวร เอื้อดี และคุณเกรียงไกร โอษฐ์ธนู ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง. ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณชาญชิต พงษ์เสนาะจากบริษัท แมคคิน - ดัลฮันดี พาวเวอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบชุดแผ่นวิลสันและชุดสายตัวนำ. ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท CAD-IT Consultants (Asia) Pte Ltd ที่ให้คำแนะนำการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT. ผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้โอกาสการศึกษาต่อและข้อมูลประกอบการทำงาน. สุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำงาน. ผู้วิจัยคาดหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์แก่ผู้อื่นในอนาคต.

แคทรียา ชูพุ่ม



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 รูปแบบของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ.....	5
2.2 โครนาดีสชาร์จ.....	7
2.3 พื้นฐานทฤษฎีไฟฟ้าสถิต.....	10
2.4 พลังงานของประจุภายใต้สนามไฟฟ้า	15
2.5 การกระจายความเร็วลม	18
2.6 งานวิจัยสายส่ง HVDC ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วลม	18
2.7 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและประจุในอากาศด้วยวิธี FVM.....	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สายส่ง HVDC ด้วยวิธี FVM.....	27
2.9 การวัดกระแสไอออนเนื่องจากโครนาดีสชาร์จ	31

2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดกระแสไอออนเนื่องจากโคโรนาดีสชาร์จ	35
2.11	อุณหภูมิของอากาศรอบสายตัวนำ.....	36
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของสายตัวนำ.....	38
บทที่ 3	การจำลองด้วยวิธี FVM	40
3.1	การจำลองหาคำตอบของสมการปัวซอง	40
3.2	การจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน.....	42
3.3	การจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดี่ยว.....	43
3.4	การจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่	48
3.5	การจำลองวิเคราะห์อุณหภูมิสำหรับสายส่ง ± 500 kV.....	55
บทที่ 4	การทดลองวัดกระแสไอออนและอุณหภูมิ.....	57
4.1	การวัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน	57
4.2	การวัดอุณหภูมิของสายตัวนำ	63
บทที่ 5	ผลการวัดกระแสไอออนและอุณหภูมิ.....	70
5.1	ผลการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนและการอภิปรายผล	70
5.2	ผลการวัดอุณหภูมิของสายตัวนำและอภิปรายผล.....	75
บทที่ 6	ผลการจำลองและอภิปรายผล.....	83
6.1	ผลการจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าของสมการปัวซอง	83
6.2	ผลการจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของสายตัวนำเหนือพื้นดิน	84
6.3	ผลการจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดี่ยว	87
6.4	ผลการจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่เปรียบเทียบกับงานวิจัย [14].....	97
6.5	สายส่ง ± 500 kV HVDC	98
บทที่ 7	สรุปผล.....	114
บรรณานุกรม.....		116
ภาคผนวก ก	การใช้งานโปรแกรม ANSYS FLUENT	120

ภาคผนวก ข การกำหนด UDS และ UDF ในแบบจำลอง	126
ภาคผนวก ค รายละเอียดผลการวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดิน.....	146
ภาคผนวก ง รายละเอียดผลจำลอง	151
ประวัติผู้เขียน	170



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	จำนวนการแบ่งโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองที่ขนาดของขอบเขตอากาศต่างๆ	43
ตารางที่ 3.2	แสดงจำนวนการแบ่งโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองสายส่ง 70 kV HVDC	46
ตารางที่ 3.3	การกำหนดตัวแปรของสายส่งแบบชั่วคราวในโปรแกรม ANSYS FLUENT	50
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขค่าตัวแปรสำหรับคำนวณความร้อนของสายตัวนำ	56
ตารางที่ 3.5	ค่าพลังงานความร้อนในการจำลองของสายตัวนำ 1272 MCM	56
ตารางที่ 4.1	ผลการวัดค่าความต้านทานของ Wilson plate ในแต่ละจุดวัด	62
ตารางที่ 5.1	ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น โดยติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง (อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 27.2°C)	77
ตารางที่ 5.2	ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 2 เส้น (อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 29.4°C)	80
ตารางที่ 6.1	ผลการจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง 70 kV HVDC	94
ตารางที่ 6.2	เปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนที่ความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s	105
ตารางที่ 6.3	ผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำ (สายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC)	109

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	รูปแบบสายส่ง 400 kV แบบขั้วเดี่ยวที่มีตัวนำไฟฟ้า DMRC [4]	5
รูปที่ 2.2	รูปแบบสายส่ง ± 800 kV แบบขั้วคู่ที่มีตัวนำไฟฟ้า DMRC [4]	6
รูปที่ 2.3	ระบบวงจรไฟฟ้าของสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ชนิดตายตัว [4]	7
รูปที่ 2.4	การเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณจากการชนกันของอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดขั้วลบ [5]	8
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและประจุตามกฎของคูลอมบ์ [8]	10
รูปที่ 2.6	ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าของพื้นที่ผิวปิด [8]	11
รูปที่ 2.7	ตัวนำทรงกระบอกวงขนานและประจุสมมาตร	13
รูปที่ 2.8	เส้นทางที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดจากจุด B ถึงจุด C	14
รูปที่ 2.9	เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าแสดงการเคลื่อนที่ของไอออนในสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ [5]	16
รูปที่ 2.10	โครงสร้างสายตัวนำและระนาบพื้นดินของสายส่ง HVDC [3]	17
รูปที่ 2.11	ความเร็วลมที่แปรผันตามความสูงเหนือพื้นดิน [10]	18
รูปที่ 2.12	ปริมาตรควบคุมและตำแหน่งของปัญหามนบริเวณ 1 มิติ [16]	25
รูปที่ 2.13	ตำแหน่งสำหรับปัญหามนบริเวณ 2 และ 3 มิติ [16]	26
รูปที่ 2.14	รูปแบบจำลองสามมิติสายส่ง ± 800 kV HVDC วางข้ามสายส่ง 500 kV HVAC [19]	29
รูปที่ 2.15	การติดตั้ง Wilson plate วัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า [22]	31
รูปที่ 2.16	แผนภูมิเค้าร่างของมอเตอร์วัดสนามไฟฟ้า Field mills ชนิดชัตเตอร์ [22]	33
รูปที่ 2.17	การเหนี่ยวนำของประจุบนผิวของอิเล็กโทรดทรงกระบอก [22]	34
รูปที่ 2.18	แผนผังของมอเตอร์วัดสนามไฟฟ้า Field mills ชนิดทรงกระบอก [22]	34
รูปที่ 2.19	แผนผังของมอเตอร์วัดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นสั้นสะท้อน [22]	34
รูปที่ 2.20	การถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำในอากาศ [27]	37
รูปที่ 2.21	ผลการจำลองอุณหภูมิและขนาดความเร็วลมของสายตัวนำในอากาศ [29]	39

รูปที่ 3.1	แบบจำลองหาคำตอบสมการปัวซองของประจุในอากาศ.....	41
รูปที่ 3.2	แบบจำลองของสายตัวนำเหนือพื้นดิน	42
รูปที่ 3.3	รูปแบบการจัดเรียงของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียวชนิดลดขนาด.....	44
รูปที่ 3.4	แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วเดียวชนิดลดขนาด	45
รูปที่ 3.5	ผังงานการจำลองในโปรแกรม	48
รูปที่ 3.6	การตั้งค่า DEFINE_SOURCE ในแต่ละบริเวณ	50
รูปที่ 3.7	การจำลองประจุไฟฟ้าของสายส่งแบบขั้วคู่	51
รูปที่ 3.8	แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 250 kV.....	52
รูปที่ 3.9	รูปแบบของสายส่ง ± 500 kV HVDC ที่ใช้ในการศึกษา.....	53
รูปที่ 3.10	แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 500 kV	54
รูปที่ 3.11	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำ	55
รูปที่ 4.1	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน	57
รูปที่ 4.2	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความหนาแน่นกระแสไอออนในห้องทดสอบ	58
รูปที่ 4.3	วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	58
รูปที่ 4.4	การติดตั้งสายทองแดง	59
รูปที่ 4.5	ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดวัสดุของแผ่นวิลสัน	59
รูปที่ 4.6	ชุดแผ่นวิลสันที่ใช้ทดสอบ.....	60
รูปที่ 4.7	ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า.....	61
รูปที่ 4.8	เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	61
รูปที่ 4.9	แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น	63
รูปที่ 4.10	การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น.....	64
รูปที่ 4.11	แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง	64
รูปที่ 4.12	การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง.....	65
รูปที่ 4.13	แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 2 เส้น	65

รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 2 เส้น.....	66
รูปที่ 4.15 อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง	66
รูปที่ 4.16 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง 1 เฟส.....	67
รูปที่ 4.17 สายตัวนำที่เคลือบอะลูมิเนียมเสริมเหล็ก	67
รูปที่ 4.18 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า	68
รูปที่ 4.19 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	68
รูปที่ 5.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน	70
รูปที่ 5.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้จากเครื่องดิจิทัลออสซิลโลสโคป กรณีไม่มีสายชิลด์.....	71
รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด $P_{0\text{ cm}}$ กรณีมีสายชิลด์ 1 เส้น.....	71
รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด $P_{0\text{ cm}}$ กรณีมีสายชิลด์ 2 เส้น.....	72
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด $P_{0\text{ cm}}$ กรณีมีสายชิลด์ 3 เส้น.....	72
รูปที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีไม่มีสายชิลด์	73
รูปที่ 5.7 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชิลด์ 1 เส้น	73
รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชิลด์ 2 เส้น	74
รูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชิลด์ 3 เส้น	75
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 1 เส้น	76
รูปที่ 5.11 ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น	76
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 1 เส้น ที่ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง	77
รูปที่ 5.13 ผลการวัดอุณหภูมิกรณีที่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ติดตั้งอยู่ด้านล่าง.....	78
รูปที่ 5.14 ผลการวัดอุณหภูมิกรณีที่ไม่ได้มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ติดตั้งอยู่ด้านล่าง.....	79
รูปที่ 5.15 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 2 เส้น	80
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิกรณีสายตัวนำ 2 เส้น	81
รูปที่ 5.17 อุณหภูมิที่บริเวณอุปกรณ์คันสายตัวนำ	82
รูปที่ 6.1 ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าที่เป็นคำตอบของสมการปัวซอง.....	83

รูปที่ 6.2 ศักย์ไฟฟ้าจากผลการจำลองเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	84
รูปที่ 6.3 ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน	85
รูปที่ 6.4 สนามไฟฟ้าที่คำนวณได้เมื่อใช้แบบจำลองขนาดขอบเขตอากาศ $150 \times 90 \text{ (m}^2\text{)}$	86
รูปที่ 6.5 ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าการจำลองต่อค่าจากวิธีเงาประจุ เมื่อแบบจำลองมีขนาดขอบเขตอากาศเท่ากับ $150 \times 90 \text{ (m}^2\text{)}$	87
รูปที่ 6.6 ผลการจำลองความหนาแน่นไอออนที่ได้สายตัวนำเป็นฟังก์ชันของเวลา t ในการจำลอง.	88
รูปที่ 6.7 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนจากความเร็วลอยเลื่อนและการแพร่ ที่ความสูงใกล้ระดับพื้นดิน	89
รูปที่ 6.8 ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีอยู่..	90
รูปที่ 6.9 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 1 เส้น.....	91
รูปที่ 6.10 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 2 เส้น.....	92
รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 3 เส้น.....	93
รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีไม่มีสายชีลด์.....	95
รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น ..	95
รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น ..	96
รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น ..	96
รูปที่ 6.16 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่งแบบชั่วคราว $\pm 250 \text{ kV}$	97
รูปที่ 6.17 สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่งแบบชั่วคราว $\pm 250 \text{ kV}$	98
รูปที่ 6.18 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไอออนของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV HVDC}$ เมื่อไม่มีลม.....	99
รูปที่ 6.19 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV HVDC}$ เมื่อไม่มีลม	100
รูปที่ 6.20 ขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV HVDC}$ เมื่อไม่มีลม	100
รูปที่ 6.21 ผลการจำลองความเร็วลมของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV HVDC}$	101
รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไอออนของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV HVDC}$ เมื่อมีลม.....	102

รูปที่ 6.23 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC เมื่อมีลม	103
รูปที่ 6.24 ขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC เมื่อมีลม	103
รูปที่ 6.25 สถิติความเร็วลมและสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนรายปี.....	104
รูปที่ 6.26 สัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	104
รูปที่ 6.27 รูปแบบความเร็วลมที่ความสูงระดับสายตัวนำ.....	105
รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบขนาดกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s.....	106
รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s.....	107
รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบขนาดกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมสูงสุด 1.6 m/s.....	107
รูปที่ 6.31 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมสูงสุด 1.6 m/s.....	108
รูปที่ 6.32 ผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำช่วงของกลุ่มวงจร 2.....	109
รูปที่ 6.33 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ กรณีไม่มีลม	110
รูปที่ 6.34 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ กรณีมีลม 0.6 m/s	111
รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบขนาดความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิของสายตัวนำ	111
รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (High voltage direct current; HVDC) เป็นสายส่งที่มีประสิทธิภาพ ใช้งานสำหรับส่งจ่ายพลังงานในระยะทางไกล เพราะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเล็กน้อย มีเสถียรภาพที่ดีในการควบคุมระบบส่งที่ทำได้ง่าย รวดเร็วกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (High voltage alternating current; HVAC) และยังใช้เป็นสายส่งเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระบบความถี่และแรงดันแตกต่างกันได้ (Unsynchronized). ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงยังเหมาะสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลใต้น้ำหรือใต้ดิน ซึ่งจำเป็นต้องใช้เชื่อมโยงแหล่งไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่อยู่ห่างไกล เพื่อลดปัญหาข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าส่งจ่ายเนื่องจากกระแสอัดประจุสูง หากส่งด้วยไฟฟ้ากระแสสลับได้อีกด้วย.

ประเทศไทยได้มีการใช้งานสายส่ง HVDC ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2544. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเริ่มนำสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศใช้งานในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าครั้งแรกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า ± 300 กิโลโวลต์ 300/600 เมกะวัตต์. สายส่งนี้เชื่อมโยงจากสถานีคลองแวงไปยังสถานีกูรูนด้วยระยะทาง 110 กิโลเมตร เพื่อแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าระหว่างประเทศไทยและประเทศมาเลเซีย [1] และเป็นสายส่ง HVDC เพียงเส้นเดียวที่ใช้งานอยู่จนถึงปัจจุบัน. ต่อมาในปี พ.ศ. 2563 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2561-2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (PDP2018 Revision 1) [2] ระบุให้มีโครงการพัฒนาระบบส่งเพื่อรับซื้อไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าประเทศเพื่อนบ้านและโครงการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าแบบระบบต่อระบบ (Grid to Grid). ทั้งสองโครงการนี้มีจุดประสงค์ปรับปรุง ขยาย และพัฒนาระบบส่งในจุดเชื่อมโยงที่มีอยู่แล้วในประเทศไทย เพื่อเตรียมความพร้อมระบบส่งรองรับการพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าอาเซียน (ASEAN Power Grid) และส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางซื้อขายไฟฟ้าของภูมิภาค ผ่านระบบส่งที่เชื่อมโยงระหว่างประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือได้ของพลังงานไฟฟ้าในภูมิภาคอาเซียน. ดังนั้นสายส่งแบบ HVDC แบบพาดในอากาศ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในการใช้งานโครงการดังกล่าว และเป็นทางเลือกสำหรับเชื่อมโยงระบบส่งระหว่างประเทศในภาคอื่นๆ ของประเทศไทยเช่นเดียวกับ สายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศของภาคใต้.

ปรากฏการณ์โคโรนาเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบใช้งานสายส่ง เพราะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในการส่งจ่ายพลังงานที่ส่งผลกระทบทางด้านความคุ้มค่าเศรษฐศาสตร์. จากการศึกษาวิจัย สายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศมีพฤติกรรมของปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ที่แตกต่างจากสายส่ง HVAC แบบพาดในอากาศ. ความแตกต่างที่สำคัญคือโคโรนาดีสชาร์จของ HVDC แบบพาดในอากาศ สามารถทำให้เกิดประจุค้าง (space charge) เคลื่อนที่ได้ในอากาศและการกระจายของประจุค้างเปลี่ยนแปลงตามแรงทางไฟฟ้าและแรงลม. ประจุค้างสามารถสะสมบนพื้นดินหรือสะสมบนวัตถุที่อยู่ข้างเคียงได้. ทั้งนี้เงื่อนไขการแตกตัวเป็นประจุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันอากาศ และความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนแปลงได้. ยิ่งไปกว่านั้นประจุค้างนี้ยังสามารถอัดประจุให้กับละอองลอย (aerosols) ทำให้สนามไฟฟ้าทั้งบริเวณพื้นดินมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอีกทางด้วย. ทั้งประจุค้างและประจุละอองลอยในอากาศส่งผลกระทบโดยตรงกับสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าของสายส่ง ก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รบกวนทางเสียง รบกวนทางคลื่นวิทยุและโทรทัศน์ ซึ่งเป็นข้อกำหนดสภาพแวดล้อมไฟฟ้าของสายส่งที่สำคัญอย่างมาก. เราจำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อความปลอดภัยต่อผู้คนที่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง [3].

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาปรากฏการณ์โคโรนาและการเคลื่อนที่ของประจุในอากาศ ด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของประจุในอากาศของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method; FVM). ผลการจำลองที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง HVDC ชนิดลดขนาด 70 kV แบบชั่วคราว. การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีการปรับเปลี่ยนจำนวนและตำแหน่งของสายชิลด์ติดตั้งอยู่ใต้สายตัวนำ. จากนั้นผู้วิจัยได้จำลองสนามไฟฟ้าและประจุในอากาศที่บริเวณสายตัวนำและพื้นดินของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศทั้งแบบชั่วคราวและชั่วคราว. ในการศึกษา ผู้วิจัยเลือกรูปแบบสายส่ง ± 500 kV HVDC ที่ติดตั้งบนโครงสร้างเดิมของสายส่ง 500 kV HVAC ซึ่งมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน. การจำลองใช้ข้อมูลความเร็วลมและอุณหภูมิของจังหวัดตัวอย่างในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเปรียบเทียบกับสนามไฟฟ้าของสายส่ง HVAC ภายในเขตเดินสายเดียวกัน. ต่อมา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการจำลองของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเนื่องจากประจุในอากาศของสายส่ง

± 500 kV HVDC เมื่อปรับค่าลมและอุณหภูมิของอากาศ. วิทยานิพนธ์สรุปข้อจำกัดและพารามิเตอร์ซึ่งมีผลต่อสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าที่จำเป็น เพื่อพิจารณาใช้ในการออกแบบสายส่ง HVDC.

1.2 วัตถุประสงค์

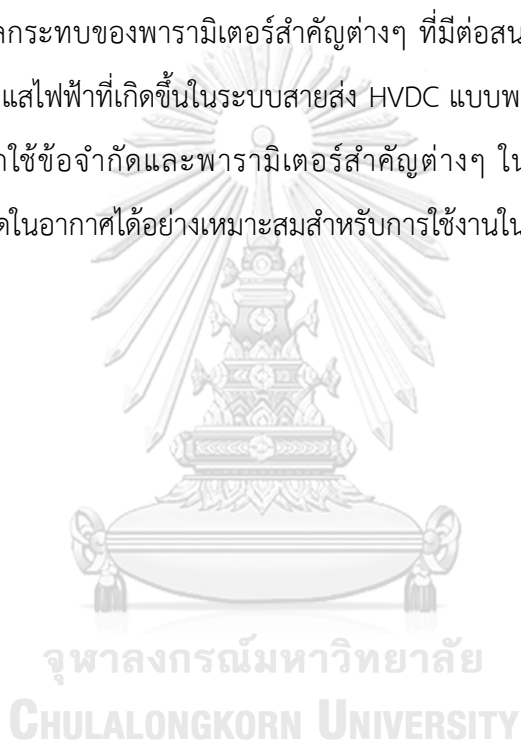
- 1.2.1 ศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับมาประยุกต์ใช้งานทางด้านสนามไฟฟ้าสถิต
- 1.2.2 ศึกษาการไหลของประจุในอากาศภายใต้ปรากฏการณ์โคโรนาบนสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ
- 1.2.3 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นประจุบนผิวสายตัวนำ บริเวณอากาศโดยรอบและบนพื้นดินในพื้นที่ของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ
- 1.2.4 พิจารณาผลของสภาพแวดล้อมจากความเร็วลมและอุณหภูมิของอากาศ ข้อจำกัดสำคัญที่ใช้ออกแบบสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศสำหรับใช้งานในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 พิจารณาและคำนวณทางด้านสนามไฟฟ้าสถิตของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ
- 1.3.2 วิเคราะห์และจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี FVM ของซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT
- 1.3.3 ยืนยันผลการจำลองที่ได้กับผลการทดลองวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง HVDC ชนิดลดขนาด 70 kV แบบชั่วคราว และผลการจำลองงานวิจัยอื่นของสายส่ง HVDC ชนิดเต็มขนาด ทั้งแบบชั่วคราวและชั่วคราว
- 1.3.4 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC จากโครงสร้างเดิมของสายส่ง 500 kV HVAC ด้วยข้อมูลสถิติของความเร็วลมจากจังหวัดขอนแก่นในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของสายตัวนำตามมาตรฐานสายตัวนำ ACSR ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 1.3.5 วิเคราะห์ข้อจำกัดและพารามิเตอร์สำคัญของสายส่ง ± 500 kV HVDC แบบพาดในอากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รับองค์ความรู้ทางด้านสนามไฟฟ้าสถิต และสามารถประยุกต์ใช้สมการวิเคราะห์การไหลของประจุในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าจากโคโรนาดีสชาร์จของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศได้อย่างถูกต้อง
- 1.4.2 ได้รับองค์ความรู้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และสามารถประยุกต์ใช้วิธี FVM วิเคราะห์สมการปัวซองและสมการการเคลื่อนที่ของประจุทางไฟฟ้า เพื่อจำลองสายส่งทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง
- 1.4.3 เข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่มีต่อสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุ และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ
- 1.4.4 สามารถใช้ข้อจำกัดและพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ในการออกแบบสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศได้อย่างเหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ประเทศไทย



บทที่ 2

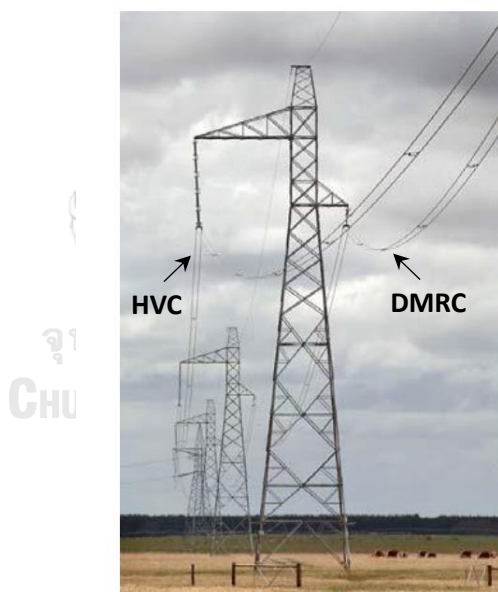
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ

รูปแบบของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศที่มีการใช้งานในปัจจุบัน มีดังนี้ [4]

2.1.1 สายส่งแบบขั้วเดียว (Monopolar Line)

สายส่งแบบขั้วเดียวประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้าแรงสูง (High voltage conductor; HVC) และตัวนำไฟฟ้านิวทรัล (Neutral conductor) อย่างละหนึ่งเส้น. หากตัวนำไฟฟ้านิวทรัลถูกใช้เป็นทางเดินไหลกลับของกระแสไฟฟ้าจะเรียกตามหน้าที่การใช้งานเป็น ตัวนำไฟฟ้าทางเดินไหลกลับ (Dedicated metal return conductor; DMRC) ดังแสดงในรูปที่ 2.1. ในกรณีที่ใช้พื้นดินเป็นทางเดินไหลกลับเพื่อลดต้นทุนค่าก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวนำไฟฟ้า DMRC บนเสาส่ง.



รูปที่ 2.1 รูปแบบสายส่ง 400 kV แบบขั้วเดียวที่มีตัวนำไฟฟ้า DMRC [4]

2.1.2 สายส่งแบบขั้วคู่ (Bipolar Lines)

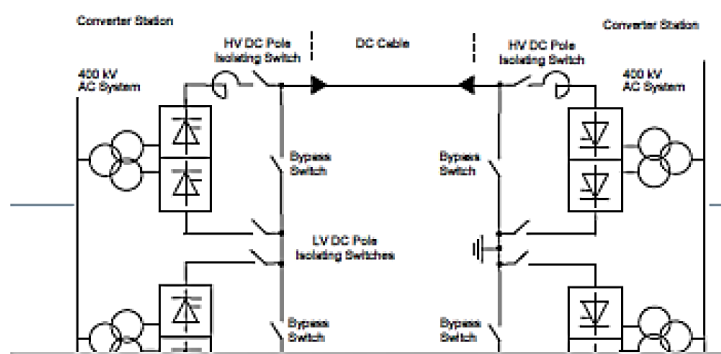
สายส่งแบบขั้วคู่ประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้าแรงสูงขั้วบวกและขั้วลบ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวนำไฟฟ้านิวทรัล. ข้อดีของสายส่งรูปแบบนี้ที่ทำให้เป็นที่นิยมใช้งานคือ เมื่อระบบเกิดข้อผิดพลาด (fault) จำนวนหนึ่งขั้ว พิกัดของสายส่งจะหายไปเพียง 50% โดยสามารถ

A photograph of a high-voltage transmission tower. The tower is a lattice structure. At the top, there are three main horizontal arms. The left arm is labeled '+HVC' with an arrow pointing to it. The central arm is labeled 'DMRC' with an arrow pointing to it. The right arm is labeled '-HVC' with an arrow pointing to it. The tower is situated in a grassy field under a clear blue sky. In the background, other transmission towers are visible.

2.1.3 รูปแบบของตัวนำไฟฟ้าของสายส่งแบบชั่วคราว

สายส่งแบบขั้วคู่สองวงจร (Double Bipolar Lines) เป็นสายส่งที่มีตัวนำไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 4 เส้น บนเสาส่งต้นเดียวกัน. สายส่งแบบขั้วคู่สองวงจรนี้ใช้งานในกรณีมีพื้นที่เขตเดินสายส่งจำกัดและไม่สามารถสร้างเสาส่งแยกสองต้นสองวงจรได้. สายส่งแบบขั้วคู่ชนิดตายตัว (Rigid Bipolar Line) เป็นสายส่งที่มีตัวนำไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 2 เส้น และใช้พื้นดินเป็นทางเดินไหลกลับ. สายส่งรูปแบบขั้วคู่ชนิดตายตัวนี้ถูกออกแบบเป็นพิเศษ ให้สามารถเปลี่ยนเป็นรูปแบบขั้วเดี่ยวได้ โดยใช้ชุดสวิตช์บายพาสที่อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ของสถานีไฟฟ้าต่งแสดงด้วยระบบวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.3. รูปแบบขั้วคู่ชนิดตายตัวนี้ใช้งานในสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศที่มีระยะทางไกลมากที่

ไม่ต้องการใช้ตัวนำไฟฟ้า DMRC. รูปแบบชั่วคราวชนิดตายตัวยังนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในงานสายเคเบิลใต้น้ำ HVDC เพื่อลดต้นทุนของสายเคเบิลที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า DMRC.



รูปที่ 2.3 ระบบวงจรไฟฟ้าของสายส่ง HVDC แบบชั่วคราวชนิดตายตัว [4]

2.2 โคโรนาดิสชาร์จ

2.2.1 การเกิดดิสชาร์จในก๊าซ

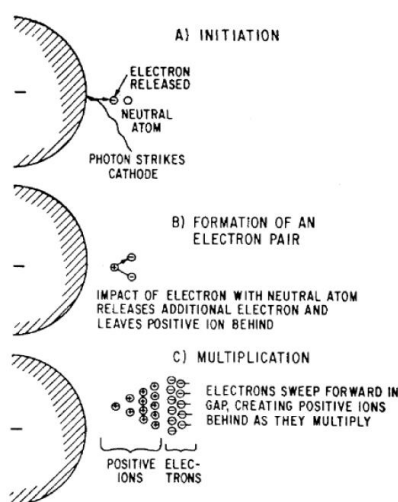
การเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าของก๊าซ เป็นผลจากการชนของอิเล็กตรอนอิสระกับอะตอมของไนโตรเจน ออกซิเจน และก๊าซอื่นๆ ในบรรยากาศ. อิเล็กตรอนอิสระนี้ถูกเร่งความเร็วด้วยสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจลน์เพิ่ม. การชนของอิเล็กตรอนอิสระกับอะตอมส่วนใหญ่เป็นแบบยืดหยุ่น คล้ายกับการชนกันระหว่างลูกบิลเลียดสองลูก. อิเล็กตรอนจึงสูญเสียพลังงานจลน์เพียงเล็กน้อยในการชนแต่ละครั้ง. แต่ในการชนบางครั้งอาจเป็นการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นเพราะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์เพียงพอแล้วต้องเกิดการเปลี่ยนสถานะโคจร และสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปให้อะตอมเปลี่ยนเป็นสถานะพลังงานที่สูงขึ้น. ต่อมาหากอะตอมพลังงานสูงกลุ่มนี้ได้รับการกระตุ้นให้กลับสู่สถานะพลังงานปกติ จะส่งผลให้เกิดการแผ่รังสีของพลังงานส่วนเกินในรูปของแสงสีน้ำเงินหรือสีม่วงจางๆ ที่มองเห็นได้ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.

การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นไม่เพียงแต่กระตุ้นอะตอมให้มีพลังงานสูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังสามารสร้างไอออนใหม่ได้โดยการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของก๊าซ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization process). เราสามารถอธิบายกระบวนการได้ด้วยปฏิกิริยาการชนกันดังนี้



เมื่อ A คืออะตอมของก๊าซก่อนถูกชน
 A^+ คือไอออนบวกของอะตอมหลังถูกชน
 e คืออิเล็กตรอนอิสระ

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเมื่อได้รับพลังงานจลน์สูงเพียงพอ วิ่งไปชนกันกับอะตอมที่มีสถานะเป็นกลางอีกครั้ง แล้วมีการชนต่อไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ (electron avalanche) ดังแสดงในรูปที่ 2.4. อิเล็กตรอนเริ่มต้นของกระบวนการไอออไนเซชันเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ เช่น พลังงานแสง พลังงานความร้อน หรือพลังงานจากรังสีต่างๆ เป็นต้น [5].



รูปที่ 2.4 การเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณจากการชนกันของอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดขั้วลบ [5]

2.2.2 สนามไฟฟ้าวิกฤตของโคโรนาดีสชาร์จ

โคโรนาดีสชาร์จเป็นรูปแบบหนึ่งของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge; PD) ซึ่งเป็นดีสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เกิดขึ้นในบริเวณปลายของอิเล็กโทรดแหลมและขอบคม. ที่บริเวณดังกล่าว ดีสชาร์จเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีไอออนไนเซชันของอากาศหรือก๊าซรอบๆ อิเล็กโทรดที่สามารถแตกตัวเพิ่มมากขึ้นได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น.

สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าของอากาศมีความเข้มสูงกว่าค่าวิกฤตของสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset electric field;

E_C) ซึ่งมักเป็นที่ผิวสายตัวนำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุของโมเลกุลในอากาศ. เราสามารถสังเกตการเกิดโคโรนาดีสชาร์จจากปรากฏการณ์ทางแสงและเสียงออกมารอบๆ สายตัวนำ. โคโรนาดีสชาร์จทำให้เกิดพลังงานสูญเสียจากสายส่งและเกิดการรบกวนทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference; EMI) ไปยังบริเวณข้างเคียงได้อีกด้วย. ขนาดของ E_C ขึ้นอยู่กับการจัดวางของสายตัวนำ ก๊าซที่ประกอบอยู่และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นที่สำคัญ ได้แก่ สภาพอากาศ สภาพผิวของสายตัวนำ เป็นต้น. เมื่อพิจารณาสายตัวนำทรงกระบอกวางขนานกับพื้นดินโดยมีฉนวนเป็นอากาศโดยรอบ เราสามารถคำนวณค่า E_C (kV/cm) ได้ โดยใช้กฎของพีค (Peek's law) [6].

$$E_C = mE_0\delta \left[1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r_c}} \right] \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{273 + t_0}{273 + t} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ	E_0	คือค่าคงที่สำหรับตัวนำที่ชั่วแรงดันเป็นบวกลบมีค่าเท่ากับ 33.7 และ 31.0 kV/cm ตามลำดับ
	K	คือค่าคงที่สำหรับตัวนำที่ชั่วแรงดันเป็นบวกลบมีค่าเท่ากับ 0.24 และ 0.308 cm ^{1/2} ตามลำดับ
	m	คือตัวประกอบที่ขึ้นกับสภาพความเรียบของผิวสายตัวนำ มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 - 0.85 สำหรับสายตีเกลียวใหม่ มีค่าอยู่ในช่วง 0.3 - 0.6 สำหรับสายตีเกลียวใช้งานแล้วหรือมีสิ่งปนเปื้อนสะสมที่ผิวสาย เช่น แมลง, ฟีช, หยดน้ำ, หิมะ, น้ำแข็ง เป็นต้น
	r_c	คือรัศมีสายตัวนำ (cm)
	δ	คือความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์
	t	คืออุณหภูมิใช้งานของสายตัวนำ (°C)
	t_0	คืออุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 25 °C
	p	คือความดันอากาศใช้งานของสายตัวนำ (mmHg)
	p_0	คือความดันอากาศอ้างอิงระดับน้ำทะเลเท่ากับ 760 mmHg

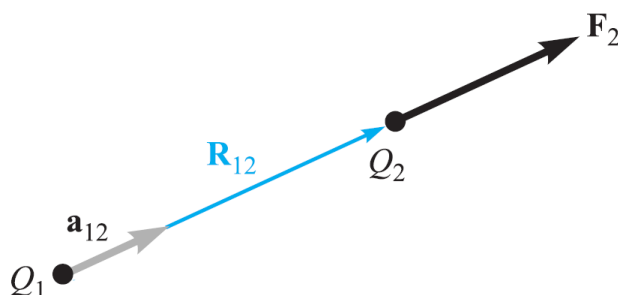
2.3 พื้นฐานทฤษฎีไฟฟ้าสถิต

2.3.1 กฎของคูลอมบ์และความเข้มสนามไฟฟ้า

กฎของคูลอมบ์ (Coulomb' law) กล่าวว่าไว้ว่าแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับขนาดของประจุไฟฟ้า และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุกกำลังสอง โดยมีค่าคงตัวเชิงสัดส่วนเท่ากับ $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ เมื่อพิจารณาประจุอยู่ในสุญญากาศ. คำอธิบายข้างต้นสามารถแสดงได้ด้วยตำแหน่ง, ระยะห่าง, ทิศทางของประจุ Q_1 และประจุ Q_2 ดังรูปที่ 2.5 รวมทั้งเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเวกเตอร์ระหว่างทั้งสองประจุได้ดังนี้ [7]

$$\mathbf{F}_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^2} \mathbf{a}_{12} \quad (2.4)$$

- เมื่อ \mathbf{F}_2 คือเวกเตอร์แรงที่เกิดขึ้นกับประจุ Q_2 เนื่องจากประจุ Q_1 (Newton)
 \mathbf{R}_{12} คือเวกเตอร์ระยะห่างจากประจุ Q_1 ไปยังประจุ Q_2 (m)
 \mathbf{a}_{12} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ \mathbf{R}_{12} (m)
 ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) เท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและประจุตามกฎของคูลอมบ์ [8]

หากพิจารณาสมการที่ (2.4) ให้ประจุ Q_2 เป็นประจุทดสอบใดๆ Q_t ซึ่งอยู่รอบบริเวณของประจุ Q_1

$$\mathbf{F}_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} \mathbf{a}_{1t} \quad (2.5)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity; \mathbf{E}) จึงนิยามได้ด้วยแรงต่อประจุทดสอบหนึ่งหน่วย โดยมีหน่วยเป็น N/C หรือ V/m.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} \mathbf{a}_{1t} \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของความเข้มสนามไฟฟ้าจากจุดประจุ Q และขนาดของระยะห่างจากจุดอ้างอิง R ดังนี้

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{a}_R \quad (2.7)$$

2.3.2 ความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร

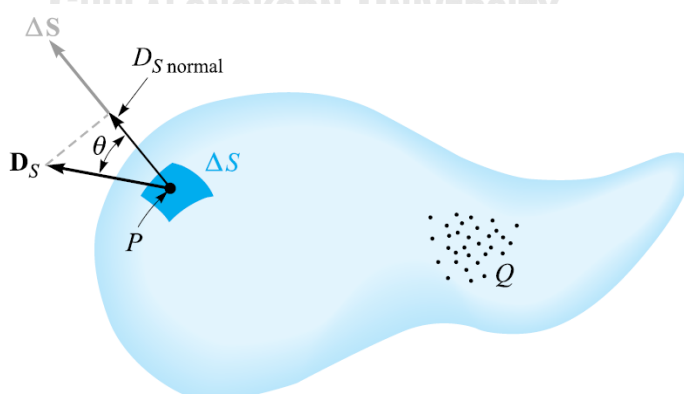
เราสามารถคำนวณความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร ρ_v ได้โดยประยุกต์ใช้กฎของเกาส์ (Gauss's Law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ปริมาณฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ตัดผ่านพื้นที่ผิวปิดใดๆ มีค่าเท่ากับประจุทั้งหมด Q ภายในพื้นที่ผิวปิดนั้น. ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าในอากาศที่มีทิศทางตั้งฉากพื้นที่ผิวปิดในรูปที่ 2.6 เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าและความสัมพันธ์ทั้งหมด [8]

$$\psi = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q = \int \rho_v dv \quad (2.8)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (2.9)$$

เมื่อ ψ คือปริมาณฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมด (C)

\mathbf{D} คือความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (C/m^2)



รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าของพื้นที่ผิวปิด [8]

2.3.3 สนามไฟฟ้าจากตัวนำทรงกระบอกเหนือพื้นดิน

เราสามารถใช่วิธีเงาประจุ (Method of Images) คำนวณหาสนามไฟฟ้าของบริเวณอากาศโดยรอบตัวนำทรงกระบอกรัศมี R ที่อยู่เหนือพื้นดินได้. สมมติให้ตัวนำมีประจุจริงเชิงเส้น ρ_{l+} อยู่เหนือแผ่นระนาบสมมาตรที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่าศูนย์ และมีตัวนำเสมือนประจุเชิงเส้น ρ_{l-} แสดงในรูปที่ 2.7. ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่จุด P จึงเกิดจากผลรวมจากประจุเชิงเส้น ρ_{l+} และ ρ_{l-} เทียบกับระนาบสมมาตรที่มีระยะห่าง $b/2$ [8].

$$V_P = \left[\frac{\rho_{l+}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(b/2)}{r'} \right] + \left[\frac{\rho_{l-}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(b/2)}{r''} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ r' คือระยะจากจุด P ถึงประจุจริงเชิงเส้น ρ_{l+}

r'' คือระยะจากจุด P ถึงประจุจริงเชิงเส้น ρ_{l-}

โดยมีขนาดและขั้วของประจุจริงเชิงเส้น $\rho_{l+} = \rho_L$ ประจุเงาเชิงเส้น $\rho_{l-} = -\rho_L$ จึงได้

$$V_P = \left[\frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(b/2)}{r'} \right] + \left[\frac{-\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(b/2)}{r''} \right] = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{r''}{r'} \right] \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.7 พิจารณารูปสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta M_1 P \rho_{l+}$ และ $\Delta M_1 P \rho_{l-}$ เราสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนด้านของสามเหลี่ยมได้

$$\frac{\overline{M_1 P}}{\overline{M_1 \rho_{l+}}} = \frac{\overline{M_1 \rho_{l-}}}{\overline{M_1 P}} \quad (2.12)$$

ซึ่งมีระยะของเส้นตรง $\overline{M_1 P} = R$, $\overline{M_1 \rho_{l+}} = c$, $\overline{M_1 \rho_{l-}} = a - c$

$$\frac{R}{c} = \frac{a - c}{R} \quad (2.13)$$

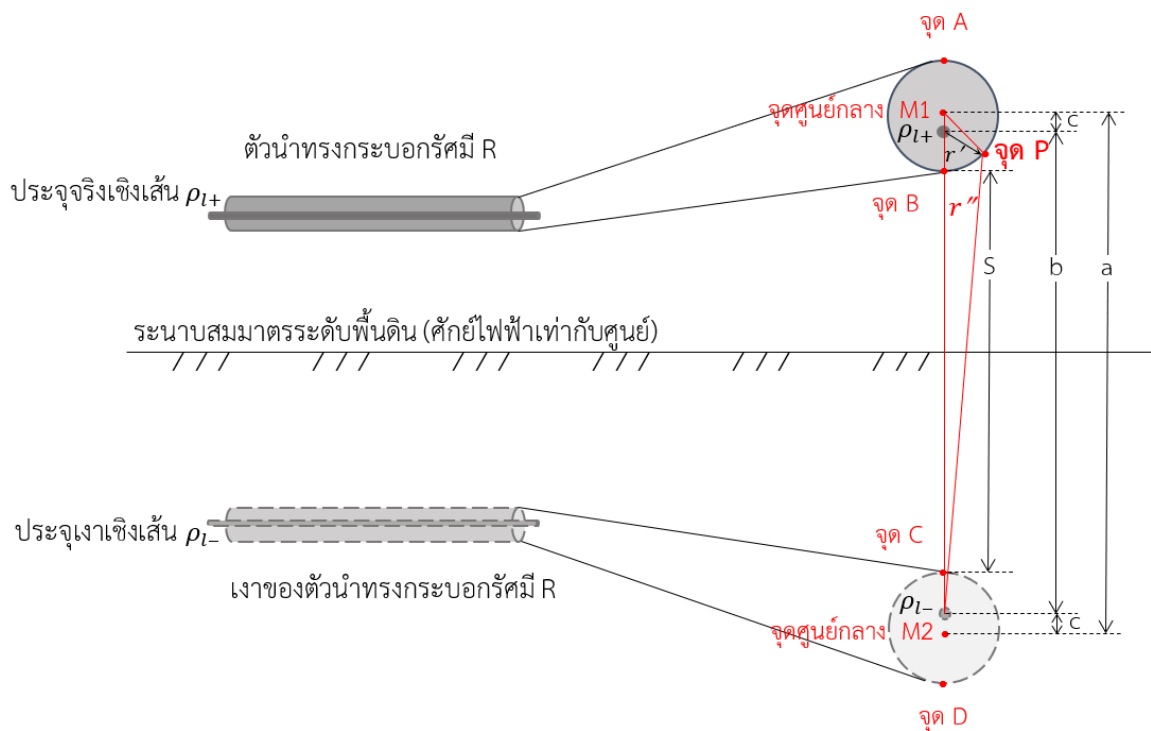
เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.13) จะได้ระยะจากศูนย์กลางตัวนำทรงกระบอกถึงประจุเชิงเส้นคือ

$$c = \frac{a}{2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - R^2} \quad (2.14)$$

ในรูปที่ 2.7 ระยะจากจุด B ถึงจุด C เป็นเส้นทางที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุด. หากกำหนดให้จุด B เป็นจุดเริ่มต้นค่า $y = 0$ โดยมีจุด P อยู่บนเส้นตรง \overline{BC} ซึ่งมีระยะ $r' = \frac{b-S}{2} + y$ และ $r'' = b - \frac{b-S}{2} - y = \frac{b+S}{2} - y$ โดยตำแหน่งใหม่ของจุด P นี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8. ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของจุด P ที่ตำแหน่งความสูงจากพื้นดินระยะ y ใดๆ สามารถคำนวณหาได้โดยแทนค่า r' และ r'' ลงในสมการที่ (2.11) ดังนี้

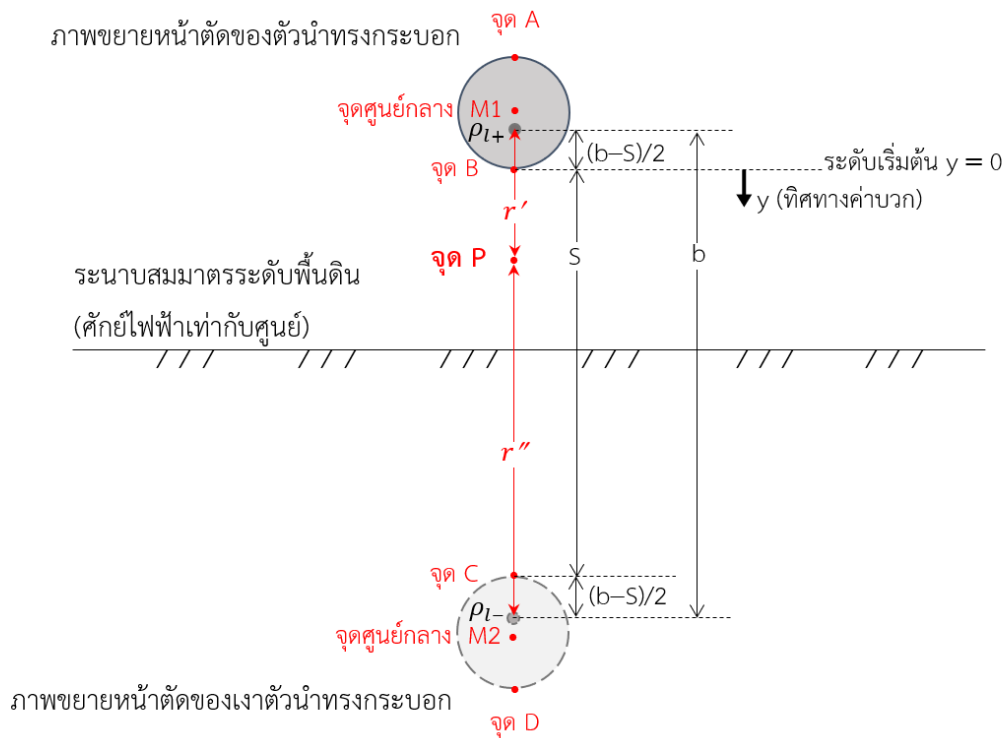
$$V_P(y) = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{r''}{r'} \right] = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{\frac{(b+S)}{2} - y}{\frac{(b-S)}{2} + y} \right] \quad (2.15)$$

ภาพขยายหน้าตัดของตัวนำทรงกระบอก



ภาพขยายหน้าตัดของเงาตัวนำทรงกระบอก

รูปที่ 2.7 ตัวนำทรงกระบอกวางขนานและประจุสมมาตร



รูปที่ 2.8 เส้นทางที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดจากจุด B ถึงจุด C

จากรูปที่ 2.8 และสมการที่ (2.15) เราสามารถแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตของผิวสายตัวนำ $V_P(y = 0) = V_0$.

$$V_0 = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{\frac{b+S}{2}}{\frac{b-S}{2}} \right] \quad (2.16)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.16) จะได้ค่า ρ_L เป็น

$$\rho_L = \frac{2\pi\epsilon_0 V_0}{\ln \frac{b+S}{b-S}} \quad (2.17)$$

แทนค่า ρ_L ลงในสมการที่ (2.15) ทำให้ได้รูปทั่วไปของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของจุด P ดังนี้

$$V_P(y) = \frac{V_0}{\ln \frac{b+S}{b-S}} \left[\ln \frac{\frac{b+S}{2} - y}{\frac{b-S}{2} + y} \right] \quad (2.18)$$

$$E_P(y) = -\frac{dV_P(y)}{dy} = \frac{V_0}{\ln \frac{b+S}{b-S}} \left[\frac{1}{\frac{b+S}{2} - y} + \frac{1}{\frac{b-S}{2} + y} \right] \quad (2.19)$$

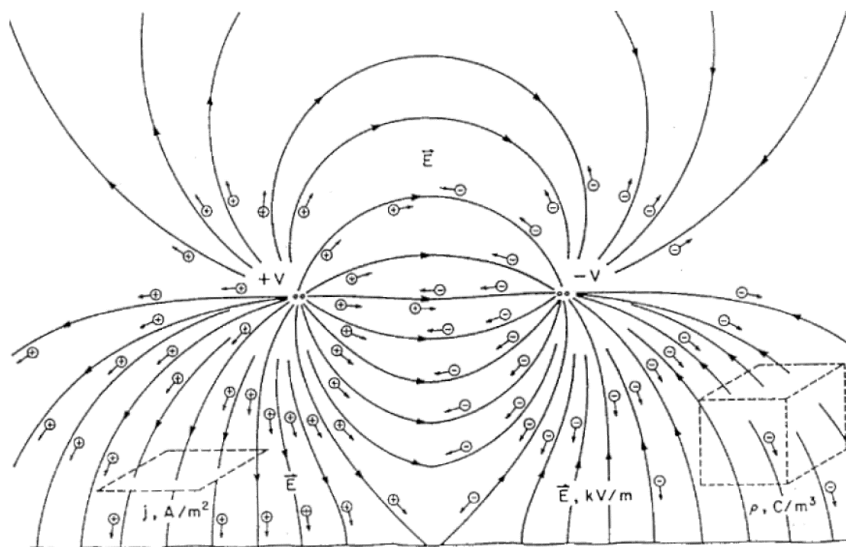
2.4 พลวัตของประจุภายใต้สนามไฟฟ้า

ในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หากสนามไฟฟ้าของอากาศบริเวณใดที่มีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตจะทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จขึ้นที่ตำแหน่งนั้นได้. ยิ่งแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นและสายตัวนำมีขนาดเล็ก โอกาสเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะยิ่งมีเพิ่มขึ้นด้วย. สำหรับสายส่ง HVDC ที่มีแรงดันคงที่ชั่วเดียวตลอดการจ่ายไฟ ส่วนที่ยื่นออกมาจากพื้นผิวสายตัวนำเช่น หยดน้ำ ฝุ่น และแมลงบนสายตัวนำสามารถเร่งให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จได้ง่ายขึ้น และยังเป็นแหล่งกำเนิดไอออนขนาดเล็กอย่างต่อเนื่อง. ในกรณีของสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ ไอออนแต่ละตัวจะถูกดึงดูดไปตามแนวสนามไฟฟ้า ไอออนประจุลบเคลื่อนออกจากตัวนำขั้วลบและไอออนประจุบวกเคลื่อนออกจากตัวนำขั้วบวกดังรูปที่ 2.9. ไอออนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเพื่อไปหาตัวนำขั้วตรงกันข้าม จึงเกิดการชนกันระหว่างไอออนกับโมเลกุลอากาศทำให้มีไอออนเพิ่มขึ้น และยังเกิดการรวมตัวกันใหม่ของประจุไฟฟ้าได้ด้วย. อย่างไรก็ตาม บางส่วนของไอออนเคลื่อนที่ไปสู่พื้นดินและสะสมที่ผิวพื้นดินได้ โดยเฉพาะบริเวณใต้สายส่ง HVDC. ประจุค้างจากโคโรนาดีสชาร์จทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นดินนั้นสูงขึ้นได้ขึ้นกับสภาพพื้นที่และความเร็วลมในขณะนั้น. การเคลื่อนที่ของไอออนดังกล่าวนี้ ถูกเร่งอย่างต่อเนื่องภายใต้แรงเท่ากับผลคูณของสนามไฟฟ้าและประจุไอออน ($\mathbf{F} = q\mathbf{E}$). ความเร็วลอยเลื่อนของไอออน (ion drift velocity) เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าดังนี้ [5]

$$\mathbf{v} = \mu \mathbf{E} \quad (2.20)$$

เมื่อ \mathbf{v} คือความเร็วลอยเลื่อนของไอออน (m/s)

μ คือค่าความเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของไอออน ($\text{m}^2/\text{V.s}$)



รูปที่ 2.9 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าแสดงการเคลื่อนที่ของไอออนในสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ [5]

การกระจายตัวของประจุไฟฟ้าเนื่องจากโคโรนาดีสชาร์จในอากาศที่บริเวณโดยรอบของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศมีผลสำคัญต่อการกระจายสนามไฟฟ้า. สำหรับสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียว ในรูปที่ 2.10(ก) กรณีที่ไม่มีความเร็วของตัวกลาง สมการควบคุมการไหลของประจุเนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตประกอบไปด้วย [9]

สมการปัวซอง
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon_0} \quad (2.21)$$

สมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
$$\mathbf{J} = \rho_v \mu \mathbf{E} - D_p \nabla \rho_v \quad (2.22)$$

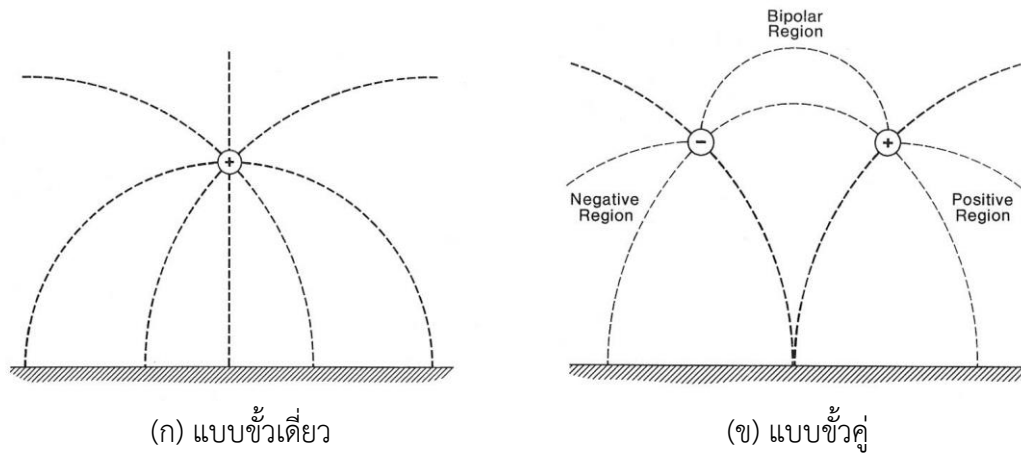
สมการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า
$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.23)$$

สมการเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าสถิต
$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2.24)$$

เมื่อ \mathbf{J} คือเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m^2)

D_p คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

ϕ คือศักย์ไฟฟ้าสถิต (V)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างสายตัวนำและระนาบพื้นดินของสายส่ง HVDC [3]

ในกรณีสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ที่มีสายตัวนำขั้วบวกและขั้วลบดังรูปที่ 2.10(ข) เมื่อพิจารณาผลกระทบของความเร็วลม \mathbf{w} เพิ่มเติมด้วย เราสามารถเขียนสมการที่ (2.21) – (2.23) ได้ดังนี้

สมการปัวซอง
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_{v+} - \rho_{v-}}{\epsilon_0} \quad (2.25)$$

สมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
$$\mathbf{J}_+ = \rho_{v+} \left[\mu_+ \mathbf{E} - \frac{D_{\rho+}}{\rho_{v+}} \nabla \rho_{v+} + \mathbf{w} \right] \quad (2.26)$$

$$\mathbf{J}_- = \rho_{v-} \left[\mu_- \mathbf{E} + \frac{D_{\rho-}}{\rho_{v-}} \nabla \rho_{v-} - \mathbf{w} \right] \quad (2.27)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_+ + \mathbf{J}_- \quad (2.28)$$

สมการความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้า
$$\frac{\partial \rho_{v+}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_+ + R_\rho \frac{\rho_{v+} + \rho_{v-}}{e} = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \rho_{v-}}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{J}_- + R_\rho \frac{\rho_{v+} + \rho_{v-}}{e} = 0 \quad (2.30)$$

เมื่อดัชนีล่าง + และ - ระบุขั้วประจุของปริมาณ

R_ρ คือสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่ของไอออน (recombination coefficient)

เท่ากับ $2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{sec}$ ที่ความดันอากาศ 760 mmHg

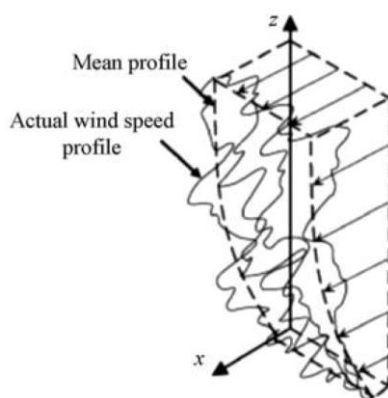
e คือประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ $1.60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$

2.5 การกระจายความเร็วลม

สำหรับการกระจายความเร็วลมโดยทั่วไป จะแปรเปลี่ยนไปตามความสูงเหนือระดับพื้นดิน ลักษณะพื้นผิวที่ลมพัดผ่าน ซึ่งแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่. กระแสลมที่แปรปรวนเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณพื้นผิวโลกหรือสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ยังส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์แรงลมเฉือน (wind shear) ความเร็วลมจึงเพิ่มขึ้นตามความสูงเหนือพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.11. ความสัมพันธ์ของขนาดความเร็วลม w_h ที่ความสูงใดๆ เหนือระดับพื้นดิน h และสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือน α สามารถประมาณได้โดยใช้กฎยกกำลัง (Power Law) [10]

$$w_h = w_r \left(\frac{h}{h_r} \right)^\alpha \quad (2.31)$$

เมื่อ w_r คือความเร็วลมที่ความสูงอ้างอิง (m/s)
 h_r คือความสูงอ้างอิงมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 10 m



รูปที่ 2.11 ความเร็วลมที่แปรผันตามความสูงเหนือพื้นดิน [10]

2.6 งานวิจัยสายส่ง HVDC ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วลม

Masanori Hara et al. [11] วัดค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระดับพื้นดินจากสายส่ง HVDC ทั้งแบบขั้วเดี่ยวและขั้วคู่ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้เมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วลมและแรงดันไฟฟ้า. การทดสอบในงานวิจัยอยู่ในพื้นที่กลางแจ้ง ใช้สายตัวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ความยาว 10.5 เมตร ติดตั้งบนลูกถ้วยโดยมีความสูงจากพื้นดิน 2 เมตร และระยะห่างสายตัวนำแบบขั้วคู่ 3 เมตร. ความเร็วลมที่กำหนดในการทดสอบมี 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขไม่มีลม (ความเร็วลมต่ำกว่า 1 m/s) และเงื่อนไขมีลมไหลสม่ำเสมอ 8 m/s จากท่อลมที่มี

ติดตั้งพัดลม 0.75kW จำนวน 12 ตัว. สนามไฟฟ้าที่พื้นดินวัดด้วยมิเตอร์สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวัดด้วยโพรบกระแสซึ่งติดตั้งอยู่เป็นระนาบกราวด์. สำหรับ HVDC แบบขั้วเดียวการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สายตัวนำสูงขึ้น ส่งผลโดยตรงให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ระดับพื้นดิน. การจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้าขั้วลบ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงกว่าการจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก. ความเร็วลมทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น 1.5 - 1.9 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขไม่มีลม. สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามขนาดของแรงดันไฟฟ้า และสูงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่สายตัวนำสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นโคโรนา. ความเร็วลมส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นดินสูงขึ้น ตำแหน่งสูงสุดเลื่อนไปทางด้านท้ายลมเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขไม่มีลม. สำหรับ HVDC แบบคู่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความเร็วลม. เมื่อแรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำมีค่าเข้าใกล้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นโคโรนา ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขั้วลบที่พื้นดินเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นโคโรนา ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขั้วบวกที่พื้นดินซึ่งมีขนาดต่ำ ๆ กลับสูงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีขนาดสูงกว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขั้วลบ. ความเร็วลมส่งผลให้บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากว้างเป็นสองเท่าและมีการกระจายแบบไม่สมมาตรเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขไม่มีลม. ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงทางด้านต้นลม เพิ่มขึ้นทางด้านท้ายลม และมีตำแหน่งสูงสุดเลื่อนไปตามทิศทางลม. สนามไฟฟ้าที่พื้นดินมีผลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สายตัวนำ ความเร็วลมมีผลต่อสนามไฟฟ้าที่พื้นดินเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับสำหรับ HVDC แบบเดี่ยว.

Tadasu Takuma and Tadashi Kawamoto [12] อธิบายวิธีการใหม่ที่มีเสถียรภาพในการคำนวณ เพื่อคำนวณการไหลของประจุเคลื่อนที่ตามลม. หลักการใหม่นี้ใช้รูปอินทิกรัลของสมการความต่อเนื่องกระแสไฟฟ้าหาศักย์ไฟฟ้าแทนการใช้สมการปัวซอง. เสถียรภาพของคำตอบเกิดจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าและค่าประจุไฟฟ้าคงที่บริเวณพื้นผิวสายตัวนำโคโรนา. การคำนวณประจุไฟฟ้าเพิ่มความแม่นยำด้วยการใช้วิธีการ upstream Finite Element Method (upstream FEM). ผลคำนวณของประจุไฟฟ้าในทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมจำนวน 306 เอลิเมนต์ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์. เนื่องจากเอลิเมนต์ที่มีจำนวนน้อย คำตอบของวิธีการใหม่จึงมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าแตกต่างจาก วิธีเชิงวิเคราะห์เท่ากับ 30% ที่บริเวณสายตัวนำและ 12% ที่บริเวณชิลด์. สำหรับกรณีมีลมพัด ผลคำนวณของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียว แรงดันไฟฟ้า 200 และ 300 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของ Masanori Hara et al. [11]. การคำนวณใช้เอลิเมนต์ชนิดหกเหลี่ยมจำนวน 850 เอลิเมนต์. ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่พื้นดินจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าผลทดสอบ 30% และ 20% ตามลำดับ. ผลคำนวณที่ระดับพื้นดิน

มีแนวโน้มคล้ายกันกับค่าที่วัดได้ในการทดสอบทั้งกรณีไม่มีลมและมีลม 8 m/s. ในงานวิจัยยังได้ทดสอบสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียว +650 kV, -650 kV และแบบขั้วคู่ ± 650 kV สองวงจรเพื่อเปรียบเทียบกับผลคำนวณเพิ่มเติม. การทดสอบใช้สายตัวนำขนาด 810 sq.mm จำนวน 4 เส้นเป็นสาย HV สำหรับขั้วคู่ และจำนวน 1 เส้นเป็นสาย HV สำหรับขั้วเดียว สายที่เหลืออีก 3 เส้นต่อลงกราวด์. ความเร็วลมที่วัดได้ต่ำกว่า 0.2 m/s จะกำหนดเป็นเงื่อนไขไม่มีลม และความเร็วลมที่วัดได้ระหว่าง 0.5 – 1.5 m/s จะกำหนดเป็นเงื่อนไขมีลม 1 m/s ซึ่งทำการทดสอบเฉพาะสายส่งแบบขั้วเดียว -650 kV เท่านั้น. ผลคำนวณจากเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมจำนวน 1376 - 1390 เอลิเมนต์ มีค่าตอบสนองไฟฟ้าที่พื้นดินใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้. แต่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทดสอบได้ มีค่าต่ำมากเพียง 10 – 20 nA/m² เป็นผลจากลมพัดประจุไฟฟ้าจากสายตัวนำกระจายออกไปตกที่บริเวณอื่น นอกพื้นที่ที่มีอุปกรณ์ทดสอบ การลดทอนประจุโคโรนาจากต้นไม้ที่อยู่ใกล้กับสายส่งทดสอบ รวมไปถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัด. ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการคำนวณจึงสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่วัดได้ค่อนข้างมาก.

Tiebing Lu et al. [13] วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ด้วยวิธี upstream FEM โดยพิจารณาความเร็วลมด้วย. ขนาดขอบเขตของแบบจำลองมีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ ผลลัพธ์จากการคำนวณจะมีความเสถียรเพียงพอก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของรัศมีพื้นที่จำลองต่อความสูงของสายตัวนำมีค่ามากกว่า 5. วิธีการ upstream FEM ช่วยเพิ่มความเสถียรในการคำนวณให้ได้คำตอบที่เข้า ลดความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงของศักย์ไฟฟ้าจากการหาคำตอบสมการปัวซองได้ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถคำนวณได้เมื่อมีความเร็วลมสูงมาก. ผลการคำนวณที่ได้ในงานวิจัยมีการทวนสอบความถูกต้องกับผลทดสอบงานวิจัยอื่น. กรณีที่ไม่มีลม เมื่อเปรียบเทียบกับสนามไฟฟ้าที่พื้นดินของสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ ± 400 kV สายตัวนำควบ 2×3.82cm ผลคำนวณกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน. กรณีที่มีลมพัด ผลคำนวณที่ได้ทั้งสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบสายส่ง HVDC +200 kV แบบขั้วเดียว. ในงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณกับสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ ± 800 kV สายตัวนำควบ 6×1.538cm ความสูงสายตัวนำเท่ากับ 18 เมตร ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 22 เมตร. เมื่อปรับเปลี่ยนค่าความเร็วลมเท่ากับ 1 – 10 m/s ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินมีขนาดสูงขึ้นและเลื่อนไปทางด้านท้ายลม. ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น แตกต่างจากค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าเริ่มคงที่เมื่อความเร็วลมมากกว่า 6 m/s. การกำหนดเขตเดินสายของสายส่ง HVDC เลือกใช้เกณฑ์ของมาตรฐานของประเทศจีนคือ ขนาดสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 15 kV/m และขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 100 nA/m². ผลการพิจารณาผลลัพธ์ที่ระดับพื้นดินเมื่อมีลม

≤ 1 m/s ขนาดของแนวเขตเดินสายสำหรับสายส่ง HVDC ± 800 kV จึงต้องมีความกว้างอย่างน้อย 78 เมตร.

P. Sarma Maruvada [14] ใช้วิธีการ Flux tracing method (FTM) ศึกษาผลของความเร็วลมกับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินภายใต้สายส่ง HVDC ทั้งแบบขั้วเดี่ยวและขั้วคู่ ซึ่งมีขนาดแรงดันไฟฟ้า 250kV. เส้นฟลักซ์ของสนามไฟฟ้าของระหว่างสายตัวนำและระนาบกราวด์ที่เปลี่ยนแปลงจากความเร็วลมตามขวางถูกกำหนดอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์. จากขั้นตอนการจำลองสำหรับสายส่งแบบขั้วเดี่ยว สรุปได้ว่าลมมีอิทธิพลต่อประจุใต้สายส่ง ทำให้ค่าสูงสุดและตำแหน่งของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้. สำหรับสายส่งแบบขั้วคู่ ความเร็วของลมส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงชัดเจนกว่าสายส่งแบบขั้วเดี่ยว. ค่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นในทิศทางไหลของลมจากสายตัวนำซ้ายลบบนไปยังสายตัวนำซ้ายบน ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่พื้นดินปรับลดลงที่ขั้วลบและปรับเพิ่มขึ้นที่ขั้วบวกได้ชัดเจนกว่าสนามไฟฟ้าที่พื้นดิน. หากลมเปลี่ยนทิศทาง รูปแบบการปรับขนาดสูงสุดของขั้วบวกและขั้วลบจะเกิดขึ้นในแนวโน้มตรงกันข้าม. ในการศึกษาผลกระทบของลม ยังเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลทดสอบระยะยาว (นานกว่า 18 เดือน) ของสายส่งทดสอบ ± 900 kV ซึ่งใช้สายตัวนำควบ 6×4.06 cm ความสูงสายตัวนำและระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากันเท่ากับ 15.2 เมตร. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่พื้นดินถูกวัดที่ระยะห่างออกมาทางด้านข้างของสายส่ง. สถิติข้อมูลลมที่วัดได้อยู่ระหว่าง -7.5 ถึง $+7.5$ m/s เครื่องหมาย $-$ คือ ลมที่ไหลจากสายตัวนำซ้ายบนไปยังขั้วลบและ $+$ คือทิศทางลมตรงกันข้าม. ผลการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วัดได้ในระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมเท่ากัน. ตัวประกอบสภาพความเรียบของผิวสายตัวนำของการจำลองมีค่าอยู่ระหว่าง $0.4 - 0.5$ จึงทำให้ขนาดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่พื้นดินมีค่าประมาณใกล้เคียงกับผลทดสอบ.

Yong Yi, Liming Wang and Zhengying Chen [15] ใช้แบบจำลองกฎยกกำลังของความเร็วลมจำลองหาค่าตอบประจุไหลในอากาศภายใต้สายส่ง HVDC เพื่อประเมินสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าก่อนก่อสร้าง. พารามิเตอร์เสถียรภาพอากาศของ Monin-Obukhov ใช้กำหนดข้อมูลลมที่วัดได้ ออกเป็นสภาวะลมคงตัว, ลมเสถียรภาพ และลมไม่คงตัว. สัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนที่แตกต่างกันตามแต่ละสภาวะของลม ถูกใช้ในแบบจำลองสมการการไหลของประจุร่วมกับวิธี Iterative flux tracing - finite difference method (IFTM-FD). วิธีการจำลอง IFTM-FD สามารถแสดงทิศทาง

การเปลี่ยนแนวของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเมื่อมีประจุโคโรนาได้. ผลการจำลองที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองของความเร็วลมในแต่ละสถานะ เปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่พื้นดินของงานวิจัยอื่นเพื่อตรวจสอบความแตกต่างของผลลัพธ์. สำหรับสายส่ง ± 250 kV ความเร็วลมคงที่ 1 m/s เมื่อปรับด้วยสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนที่ความสูง 10 เมตร ความเร็วลมเปลี่ยนไปเป็น 1.18, 1.4, 1.6 m/s สำหรับสถานะลมไม่คงตัว, ลมเสถียรภาพ และลมคงตัวตามลำดับ. ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่พื้นดินที่จำลองได้ จึงเพิ่มขึ้นจากกรณีใช้ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 5.76%, 10.8% และ 20.87% ตามลำดับของสถานะลมเช่นกัน. สำหรับสายส่ง ± 450 kV และ ± 600 kV กรณีไม่มีลมพัด ผลการจำลองด้วยวิธี IFTM-FD มีแนวโน้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่พื้นดินเป็นไปตามผลทดสอบและมีความแม่นยำกว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element; FEM). สุดท้ายเปรียบเทียบผลจากการจำลองของงานวิจัยกับข้อมูลทดสอบระยะยาวของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในระดับพื้นดินสำหรับสายส่งทดสอบ ± 900 kV ที่ความเร็วลมอยู่ระหว่าง -7.5 ถึง $+7.5$ m/s. ผลจากการจำลองด้วยความเร็วลมคงที่ทุกความสูงมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้มากกว่าการใช้พารามิเตอร์เสถียรภาพอากาศจำลองความเร็วลม. เนื่องจากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามความสูง จึงส่งผลให้ประจุโคโรนาบริเวณสายตัวนำเคลื่อนที่ไปไกล เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำและระนาบกราวด์ถูกปรับเปลี่ยนไปตามประจุเมื่อใช้สมการปัวซองหาคำตอบ. ดังนั้นสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่พื้นดินจากการจำลองที่สถานะลมต่างๆ จึงมีขนาดสูงสุดเพิ่มขึ้นและมีตำแหน่งสูงสุดเลื่อนออกไปไกลกว่าข้อมูลที่วัดได้.

2.7 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและประจุในอากาศด้วยวิธี FVM

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) คือการวิเคราะห์ระบบของไหล การถ่ายเทความร้อน และปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องการไหลโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์. CFD สามารถใช้งานในกลศาสตร์ของไหลหลายด้าน ครอบคลุมการใช้งานที่หลากหลายทั้งในและนอกอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึงอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์และเครื่องบิน อุตุนิยมวิทยาของเรือ การประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมชีวการแพทย์. การจำลองปัญหาวิศวกรรมด้วยวิธีการ CFD ประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้ [16]

ขั้นตอนก่อนประมวลผล

ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดรูปแบบของปัญหา สมการควบคุมของไหล เงื่อนไขขอบเขต คุณสมบัติของของไหล และสร้างโดเมนที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบเรขาคณิต แบ่งเอลิเมนต์ (elements) หรือปริมาตรควบคุม (cells) ที่มีจุดต่อ (nodes) เหมาะสมกับคำตอบของปัญหาและเวลาในการคำนวณ.

ขั้นตอนการแก้ปัญหา

โปรแกรมประมวลผลหาคำตอบจากข้อมูลที่กำหนดในขั้นตอนก่อนประมวลผล โดยใช้วิธีเชิงเลขต่างๆ (เช่น FEM, FVM, FDM) และประมาณค่าด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนสมการควบคุมของไหลซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์และสมการอินทิกรัลให้เป็นสมการพีชคณิตที่คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลได้. หลังจากนั้น จึงใช้สมการพีชคณิตคำนวณค่าตัวแปรต่างๆบนเอลิเมนต์หรือปริมาตรควบคุมทั้งหมดของโดเมนคำนวณซ้ำ เพื่อให้ได้ความแม่นยำและเสถียรภาพเหมาะสมตามที่ต้องการ.

ขั้นตอนหลังประมวลผล

ขั้นตอนนี้คำนวณคำตอบที่ได้รับจากการแก้ปัญหา ให้เป็นข้อมูลผลลัพธ์วิเคราะห์ปัญหาได้และแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น รูปร่างของปัญหา กราฟเวกเตอร์ กราฟพื้นผิว กราฟการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เป็นต้น.

สำหรับการแก้ปัญหาด้วย CFD ผู้วิจัยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT ซึ่งใช้วิธี FVM จำลองปัญหาสนามไฟฟ้าและวิเคราะห์เชิงปริมาตรควบคุม. วิธี FVM ใช้หลักการคำนวณผลลัพธ์จากฟลักซ์ ที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของแต่ละปริมาตรควบคุม โดยการประมาณค่าฟลักซ์แบบเชิงเลขผ่านทุกขอบของปริมาตรควบคุมด้วยวิธีผลต่างกลาง (Central differencing) หรือวิธีผลต่างต้นลม (Upwind differencing) หรือวิธีอื่นที่พัฒนาขึ้นมาใหม่. รูปทั่วไปของปัญหาการแพร่-การพาด้วยการไหลแบบไม่คงตัว (Convection-Diffusion problems for unsteady flows). สมการสำหรับวิเคราะห์ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการไหลตามเวลา t อยู่ในรูปของ

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi - \Gamma \nabla \phi) = S_\phi \quad (2.32)$$

เมื่อ ϕ คือปริมาณสเกลาร์ที่สนใจวิเคราะห์ (unit/kg) ของของไหล

ρ คือความหนาแน่นเชิงปริมาตรของของไหล; kg/m^3

\mathbf{u} คือเวกเตอร์ความเร็ว (m/s)

Γ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ϕ (m²/s)

S_ϕ คือแหล่งกำเนิดหรืออัตราการเกิดของ ϕ (unit/(m³.s)) ประมาณค่าได้ด้วยฟังก์ชัน

$$S_\phi = S_U + S_P \phi$$

ทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.32) พจน์ที่ 1 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของ ϕ , พจน์ที่ 2 และ 3 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ เนื่องจากการพาและการแพร่ ตามลำดับ. การหาคำตอบของสมการที่ (2.32) ทำได้โดยการหาอินทิกรัลทั่วทั้งปริมาตรของไหล และใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนต์ของเกาส์ แปลงอินทิกรัลเชิงปริมาตรเป็นอินทิกรัลเชิงผิวที่มีเวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว. ในกรณีการไหลคงตัว (steady flows) พจน์ที่ 1 ทางด้านซ้ายมือมีค่าเป็นศูนย์ และเราสามารถหาคำตอบของสมการที่ (2.32) ได้โดยใช้อินทิกรัลเชิงปริมาตรเท่านั้น. สำหรับกรณีการไหลไม่คงตัว สมการของปัญหายังคงมีอินทิกรัลตามช่วงเวลา Δt ประกอบอยู่. การหาคำตอบ ϕ ตามขั้นตอนข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้.

จากอินทิกรัลเชิงปริมาตรของสมการที่ (2.32) บนปริมาตรควบคุม (Control volume; CV)

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{CV} [\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi - \Gamma \nabla \phi)] dV = \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.33)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (2.33) ให้อยู่ในรูปอินทิกรัลเชิงผิว โดยให้เวกเตอร์ตั้งฉาก \mathbf{n} กับพื้นผิว มีทิศพุ่งออกจากพื้นผิวเราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho \phi dV \right) + \oint_A \mathbf{n} \cdot \rho \mathbf{u} \phi dA - \oint_A \mathbf{n} \cdot \Gamma \nabla \phi dA = \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.34)$$

การคำนวณในกรณีการไหลแบบไม่คงตัวจะใช้อินทิกรัลตามช่วงเวลา Δt

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho \phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \oint_A \mathbf{n} \cdot \rho \mathbf{u} \phi dA dt - \int_{\Delta t} \oint_A \mathbf{n} \cdot \Gamma \nabla \phi dA dt = \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt \quad (2.35)$$

สำหรับบริเวณ 1 มิติ ตัวอย่างการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมตามวิธี FVM แสดงได้ดังรูปที่ 2.12(ก). ปริมาตรควบคุมสำหรับจุด P อยู่ระหว่างจุด W และจุด E โดยมีขอบ (faces) ของ

ปริมาตรควบคุมด้านซ้ายและด้านขวาเป็นจตุรรอยต่อ w และ e ตามลำดับ. ให้ δx แสดงระยะห่างระหว่างแต่ละตำแหน่งโดยมีดัชนีล่างแสดงขอบเขต. ดังนั้นเราจึงสามารถจัดสมการที่ (2.32) สำหรับกรณีของไหลคงตัวให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$\rho u A \phi_P - \Gamma A \frac{d\phi_P}{dx} = S_\phi \Delta V \quad (2.36)$$

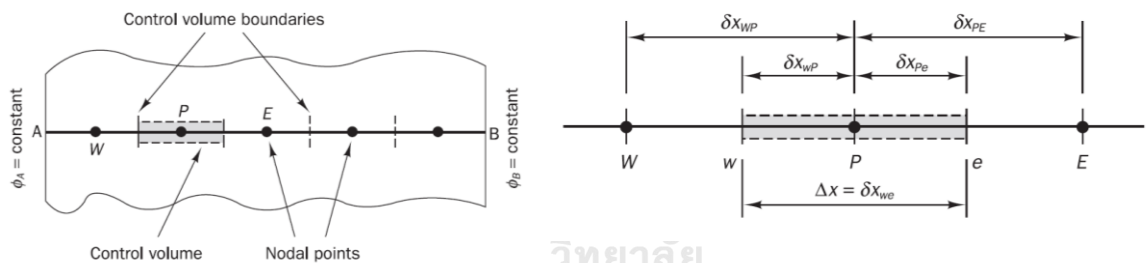
เมื่อนำสมการที่ (2.36) ประมวลค่าจตุรรอยต่อและปริมาตรควบคุมข้างเคียงแต่ละจุดให้สัมพันธ์กับเงื่อนไขขอบเขตของโดเมน คำตอบของ ϕ_P สามารถหาได้จากรูปแบบสมการทั่วไปดังนี้

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + (S_U + S_P \phi_P) \quad (2.37)$$

เมื่อ a_P และ a_{nb} คือสัมประสิทธิ์จากการประมวลค่าฟลักซ์การพาและการแพร่

ϕ_P คือค่า ϕ ของปริมาตรควบคุมจุด P

ϕ_{nb} คือค่า ϕ ของปริมาตรควบคุมจุดข้างเคียง



(ก) การแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุม (ข) ขอบปริมาตรควบคุมและจุดต่อแบบ 1 มิติ

รูปที่ 2.12 ปริมาตรควบคุมและตำแหน่งของปัญหาบนบริเวณ 1 มิติ [16]

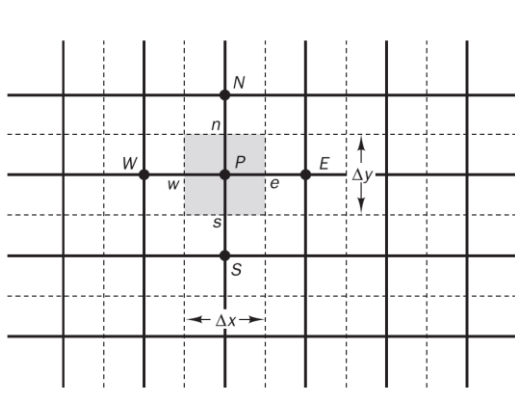
สำหรับปัญหาบนบริเวณ 1 มิติ เมื่ออ้างอิงรูปที่ 2.12(ข) $\sum a_{nb} \phi_{nb}$ อยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\sum a_{nb} \phi_{nb} = a_W \phi_W + a_E \phi_E \quad (2.38)$$

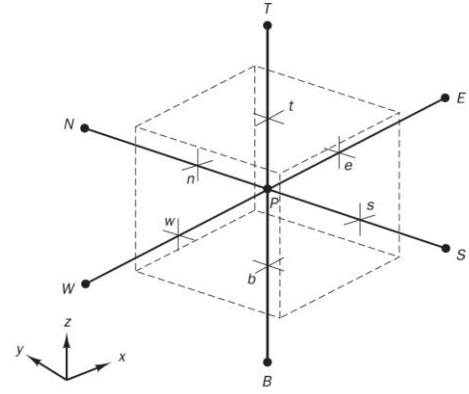
สำหรับปัญหาบนบริเวณ 2 และ 3 มิติ เมื่ออ้างอิงรูปที่ 2.13(ก) และ 2.13(ข) จะเขียนได้เป็น

$$\sum a_{nb} \phi_{nb} = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S \quad (2.39)$$

$$\sum a_{nb} \phi_{nb} = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B \quad (2.40)$$



(ก) ขอบปริมาตรควบคุมและจุดต่อแบบ 2 มิติ



(ข) ขอบปริมาตรควบคุมและจุดต่อแบบ 3 มิติ

รูปที่ 2.13 ตำแหน่งสำหรับปัญหามิติ 2 และ 3 มิติ [16]

โดยทั่วไป เราสามารถประมาณค่าอินทิกรัลตามช่วงเวลา Δt โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพารามิเตอร์ θ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1. ระหว่าง ϕ_P^0 ที่เวลา t และ ϕ_P ที่เวลา $t + \Delta t$.

$$\int_t^{t+\Delta t} \phi_P dt = [\theta \phi_P + (1 - \theta) \phi_P^0] \Delta t \quad (2.41)$$

ดังนั้น สำหรับกรณีการไหลไม่คงตัว เราสามารถประมาณสมการที่ (2.35) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \left(\rho \Delta V \frac{\phi_P - \phi_P^0}{\Delta t} \right) \Delta t + \left[\theta \left(\rho u A \phi_P - \Gamma A \frac{\Delta \phi_P}{\Delta x} \right) + (1 - \theta) \left(\rho u A \phi_P^0 - \Gamma A \frac{\Delta \phi_P^0}{\Delta x} \right) \right] \Delta t \\ = S_\phi \Delta V \Delta t \end{aligned} \quad (2.42)$$

เมื่อเราจัดรูปใหม่โดยหารด้วย $A \Delta t$. และเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมเพื่อหาคำตอบ ϕ_P ณ เวลา $t + \Delta t$ จะได้

$$\left(\frac{\phi_P - \phi_P^0}{\Delta t} \right) \rho \Delta x + \left[\theta \left(\rho u \phi_P - \Gamma \frac{\Delta \phi_P}{\Delta x} \right) + (1 - \theta) \left(\rho u \phi_P^0 - \Gamma \frac{\Delta \phi_P^0}{\Delta x} \right) \right] = S_\phi \Delta V \quad (2.43)$$

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} [\theta \phi_{nb} + (1 - \theta) \phi_{nb}^0] + [a_P^0 - \sum (1 - \theta) a_{nb}] \phi_P^0 + (S_U + S_P \phi_P) \quad (2.44)$$

เมื่อ a_p คือสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการประมาณค่าฟังก์ชันการพาและการแพร่ที่เวลาระหว่าง t และ $t + \Delta t$

$$a_p = \theta \sum a_{nb} + a_p^0 \quad (2.45)$$

$$a_p^0 = \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.46)$$

ในสมการที่ (2.41) ถึง (2.46) ดัชนีบน 0 แสดงค่าปริมาณ ณ เวลา t ของ ϕ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สายส่ง HVDC ด้วยวิธี FVM

Han Yin et al. [17] วิเคราะห์การติดตั้งใช้งานสายส่ง ± 800 kV UHVDC วางแบบขนานกับสายส่ง 1000 kV UHVAC ในพื้นที่แนวสายส่งเดียวกัน. ขั้นตอนวิธีการเริ่มต้นโดยใช้วิธีการจำลองประจุ (Charge Simulation Method; CSM) หาคำตอบสนามไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าที่สายตัวนำขณะเดียวกันได้ใช้ FEM หาคำตอบสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุ. สนามไฟฟ้าที่ได้จากสองวิธีถูกใช้เป็นผลลัพธ์สนามไฟฟ้าทั้งหมดของอากาศรอบๆสายตัวนำ. เมื่อผลลัพธ์สนามไฟฟ้านี้สูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตโคโรนาตาม Peek' law การคำนวณจะเพิ่มประจุที่ผิวสายตัวนำและใช้วิธีการ FVM หาคำตอบการเคลื่อนที่ประจุในอากาศตามเวลาและคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากประจุที่เพิ่มขึ้นมา. หากสนามไฟฟ้า HVDC ที่พื้นดินยังไม่คงที่ ก็จะเพิ่มขึ้นเวลาคำนวณและกลับไปคำนวณซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้นใหม่จนกว่าจะได้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนตรงตามที่ต้องการ.

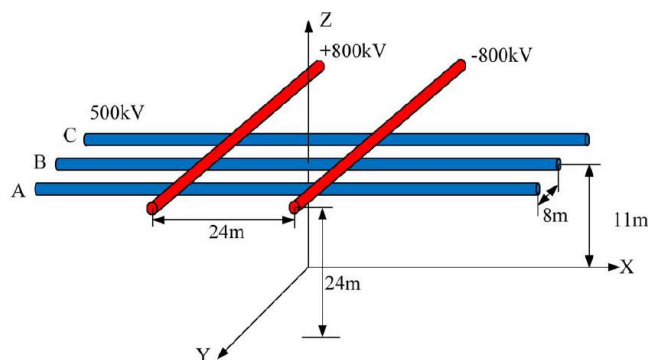
งานวิจัยได้เปรียบเทียบผลคำนวณสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของประจุที่พื้นดินกับผลการทดสอบสายส่งไฮบริดชนิดลดขนาดของงานวิจัยอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าสามรูปแบบ ได้แก่ -34.8 kV HVDC และ 24.6 kVrms HVAC, ± 34.8 kV HVDC และ 16.4 kVrms HVAC, ± 34.8 kV HVDC และ 0 kVrms HVAC. ผลการเปรียบเทียบพบว่า ผลคำนวณกรณีพิจารณาโคโรนาของสายส่งที่มี HVDC เพียงอย่างเดียวให้ผลลัพธ์ที่ตรงกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบมากกว่า. Han Yin et al. ได้ทดสอบสายส่งไฮบริดชนิดลดขนาด ± 50 kV HVDC และ 20 kVrms HVAC เพิ่มเติม ซึ่งวัดค่าสนามไฟฟ้าและวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุด้วยอุปกรณ์ Field mill และแผ่นวิลสันตามลำดับ. ผลการวัดสนามไฟฟ้า DC และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุที่พื้นดินให้ผลลัพธ์ที่ตรงกับผลคำนวณเท่านั้น. ผลการวัดสนามไฟฟ้า AC มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากอุปกรณ์ Field mill ไม่มีเสถียรภาพในการหมุนระหว่างการวัดและมีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ

ที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบ. งานวิจัยของ Han Yin et al. ได้นำขั้นตอนวิธีการคำนวณมาประยุกต์ใช้กับสายส่งวางแบบขนานระหว่าง ± 800 kV UHVDC และ 1000 kV UHVAC ซึ่งมีตำแหน่งการติดตั้งและสายตัวนำขนาดจริงจากการออกแบบใช้งานมาวิเคราะห์. ผลวิเคราะห์พบว่า การเปลี่ยนมุมเฟสของสายส่ง UHVAC จะทำให้ค่าความหนาแน่นประจุที่สายตัวนำขั้วลบเปลี่ยนแปลงสูงกว่าที่สายตัวนำขั้วบวกและประจุทั้งหมดมีทิศทางเคลื่อนที่ไปทางด้าน UHVAC. ผลการเปลี่ยนมุมเฟสนี้ จึงทำให้ผลลัพธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุที่พื้นดินใต้สายส่ง UHVDC ทั้งขั้วบวกขั้วลบมีค่าลดน้อยลง. สนามไฟฟ้าที่พื้นดินมีค่าน้อยลงเมื่อมี UHVAC จ่ายไฟใช้งาน. การจัดวางสายส่ง UHVDC อยู่ใกล้สายส่ง UHVAC มากขึ้น จะลดการรวมประจุในอากาศระหว่างสายตัวนำขั้วบวกและขั้วลบ ทำให้มีประจุคงเหลือในอากาศสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อหิมะค่าสนามไฟฟ้าสูงขึ้นได้เช่นกัน. ดังนั้นสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุที่พื้นดินใต้สายส่ง UHVDC จึงขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายส่งทั้งสองในการออกแบบ.

Han Yin et al. [18] วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของสายส่ง ± 800 kV HVDC ในช่วงเวลาเริ่มต้นจ่ายไฟก่อนที่ระบบไฟฟ้าจะเข้าสู่ภาวะคงตัว. วิธีหาคำตอบของสนามไฟฟ้าในสมการปัวซอง (Poisson equation) คำนวณได้จากศักย์ไฟฟ้าตามเวลาสองส่วน. ส่วนแรกคือศักย์ไฟฟ้าตามเวลากรณีไม่มีประจุคำนวณโดยใช้วิธี CSM โดยมีประจุเงาจำลองเพิ่มเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นดินมีค่าเป็นศูนย์ และส่วนที่สองคือศักย์ไฟฟ้าตามเวลากรณีมีประจุคำนวณโดยใช้วิธี FEM. สำหรับการหาคำตอบสมการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transportation equation) ใช้วิธี FVM คำนวณความหนาแน่นประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา. ในวิธี FVM มีเงื่อนไขข้อจำกัดของขั้นเวลาที่ต้องกำหนด ซึ่งใช้วิธีของ Crank-Nicolson ประมาณขั้นเวลาจากขนาดของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม และในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นเวลาเท่ากับ 0.05 วินาที. รูปแบบการจำลองที่ใช้งานมีความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากผลทดสอบที่วัดได้ของสายส่ง ± 800 kV HVDC ในห้องทดสอบที่ความเร็วลม 0-3 m/s. ศักย์ไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นจ่ายไฟ 0 – 800 kV แทนได้ด้วยสมการที่เพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง โดยมีค่าคงที่เวลา 5 วินาทีและ 10 วินาที. จากผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้พบว่า ค่าคงที่เวลา 5 วินาทีจะให้อัตราการเพิ่มของสนามไฟฟ้าถึงภาวะคงตัวได้เร็วกว่า 10 วินาที ทั้งสายตัวนำขั้วบวกและตำแหน่งที่พื้นดินใต้สายตัวนำขั้วบวก. นอกจากนี้ช่วงเริ่มต้นจ่ายไฟของศักย์ไฟฟ้าค่าคงที่เวลา 10 วินาที งานวิจัยนี้ยังพบว่า สายตัวนำขั้วลบมีความหนาแน่นประจุน้อยกว่าสายตัวนำขั้วบวก. หลังจากนั้นเมื่อสายตัวนำขั้วลบเริ่มเกิด

ปรากฏการณ์โคโรนา ความหนาแน่นประจุก็จะสะสมได้รวดเร็วขึ้นด้วยค่าความเคลื่อนที่ได้ของไอออนลบที่มีค่าสูง ทำให้ความหนาแน่นประจุมีสภาวะคงตัวได้ในเวลาเดียวกันกับสายตัวนำชั่วคราว.

Xiangxian Zhou et al. [19] พัฒนาวิธีการจำลองสายส่ง $\pm 800\text{kV}$ HVDC วางข้ามสายส่ง 500kV HVAC ด้วยการใช้รูปแบบจำลองสามมิติดังรูปที่ 2.14. การคำนวณเลือกใช้วิธีการ 3D-FEM หาคำตอบสมการปัวซองตามเงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าของสายตัวนำ และเงื่อนไขขอบเขตของ Neumann ของขอบเขตอากาศที่ใช้จำลอง. สำหรับการหาคำตอบสมการเคลื่อนที่ของประจุเลือกใช้วิธีการ 3D-FVM โดยกำหนดความหนาแน่นประจุอยู่บนผิวของปริมาตรควบคุมชนิดทรงสี่หน้า (Tetrahedra). ขั้นตอนวิธีการคำนวณเริ่มต้นจากการกำหนดค่าประจุเริ่มต้น q_0 ของสายส่ง HVDC โดยที่สายส่ง HVAC ยังไม่จ่ายไฟ. หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นเวลาจนได้คำตอบที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา. ต่อมาการคำนวณ จึงเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้สายส่ง HVAC และใช้ประจุ $q_0\text{--}AC$ หาค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นเวลาเพื่อหาคำตอบที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นกัน.



รูปที่ 2.14 รูปแบบจำลองสามมิติสายส่ง $\pm 800\text{kV}$ HVDC วางข้ามสายส่ง 500kV HVAC [19]

ในงานวิจัยของ Xiangxian Zhou et al. มีการทดสอบสายส่งไฮบริดชนิดลดขนาด $\pm 70\text{kV}$ HVDC และ 30kVrms HVAC. การวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุที่พื้นดินใช้แผ่นวิลสันเพื่อพิสูจน์คำตอบจากการคำนวณ. เมื่อเปรียบเทียบผลคำนวณในกรณีที่ไม่มี HVAC พบว่ามีค่าแตกต่างกับผลทดสอบเล็กน้อย แต่ในกรณีที่มี HVAC มีค่าแตกต่างกับผลทดสอบประมาณ 19% ซึ่งใช้เป็นความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยนี้. สุดท้ายผู้วิจัยจึงนำขั้นตอนการจำลองแบบสามมิติประยุกต์ใช้กับขนาดจริงของสายส่ง $\pm 800\text{kV}$ HVDC และ 500kV HVAC. ที่ตำแหน่งจุดตัดของสายส่งทั้งสองเส้น. ในงานวิจัยนี้พบว่า สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุที่พื้นดิน

เปรียบเทียบกับผลคำนวณกรณีไม่มีสายส่ง HVAC มีค่าลดลง 47% ที่มุมตัดขวางของสายส่ง 90° และมีค่าลดลง 40% ที่มุมตัดขวางของสายส่ง 45° . อย่างไรก็ตาม สนามไฟฟ้าบนสายตัวนำของสายส่ง HVDC มีค่าสูงขึ้นที่ตำแหน่งจุดตัดสายส่ง ทำให้ยังมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์โคโรนาบนสายส่ง HVDC ได้เช่นกัน. ดังนั้นในการออกแบบสายส่งวางข้ามกัน จึงจำเป็นต้องพิจารณามุมตัดขวางระหว่างสายส่งที่ใช้งานด้วย.

Feng Tian et al. [20] ทดสอบใช้สายชีลด์ (shield wire) ติดตั้งอยู่ที่สายตัวนำชั่วคราวของสายส่ง $\pm 800\text{kV}$ HVDC ที่มีตำแหน่งความสูงและจำนวนสายตัวนำเท่ากับสายส่งที่ใช้งานอยู่จริง. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายชีลด์ พิจารณาจากผลการวัดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นดินเมื่อใช้สายชีลด์หนึ่งเส้นหรือหลายเส้น, จัดวางในแนวตั้งและแนวนอน. ผลทดสอบของงานวิจัยพบว่า การใช้สายชีลด์หลายเส้นและวางในแนวตั้งช่วยลดค่าสนามไฟฟ้าบนพื้นดินได้ดีที่สุด. ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้จะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแบบสองมิติตามเวลา. ขั้นตอนการคำนวณเลือกใช้วิธีการ CSM คำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อไม่มีประจุ และใช้วิธีการ FEM คำนวณศักย์ไฟฟ้าเมื่อมีประจุในอากาศเพิ่มเข้ามาเนื่องจากปรากฏการณ์โคโรนา. ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าทั้งสองถูกนำมาคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด. ความหนาแน่นประจุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อใช้ประกอบการหาค่าสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการข้างต้นเลือกใช้วิธีการ FVM. ผลคำนวณพบว่าสายชีลด์ช่วยให้สนามไฟฟ้าบนพื้นดินลดลงประมาณ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งสายชีลด์ เนื่องจากทิศทางสนามไฟฟ้าบางส่วนพุ่งเข้าหาสายชีลด์ จึงสามารถช่วยเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ของประจุและลดความหนาแน่นประจุที่พื้นดินได้. นอกจากนี้ สายชีลด์ดึงประจุส่วนหนึ่งของสายตัวนำชั่วคราวไว้โดยคงเหลือประจุบางส่วนที่เกิดจากสายตัวนำชั่วคราวเท่านั้น จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ช่วยลดความหนาแน่นประจุที่พื้นดินได้อีกทาง.

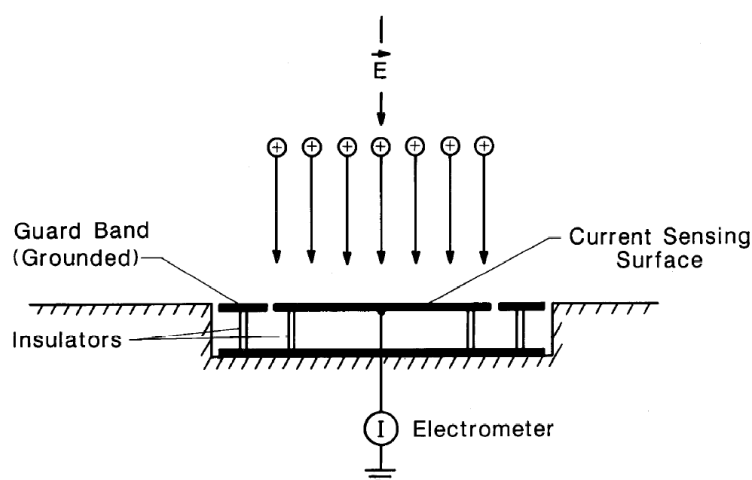
Zhenyu Li and Xuezeng Zhao [21] ศึกษาผลกระทบของลมกับสายส่ง HVDC แบบชั่วคราวที่เกิดขึ้นในกรงโคโรนาชนิดหน้าต่างสี่เหลี่ยม. การคำนวณเพิ่มความแม่นยำโดยใช้เอลิเมนต์สองชนิดมาจัดเรียงใหม่ให้มีกึ่งกลางด้านของเอลิเมนต์ร่วมกัน (Tessellation domain) และเลือกใช้วิธีการ FVM อันดับที่สอง ซึ่งมีพจน์ของเกรเดียนต์ของความหนาแน่นประจุในการหาคำตอบสมการเคลื่อนที่ของประจุ. การหาคำตอบสนามไฟฟ้าเลือกใช้วิธีการ CSM ซึ่งมีจำลองด้วยประจุทั้งบนสายตัวนำ ผังของกรงโคโรนาและจำลองเงาของประจุที่อยู่ใต้ระนาบกราวด์เพิ่มเติม. ผลคำนวณที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสายส่งชนิดลดขนาด -80 kV , -100 kV , -120 kV HVDC

ที่มีสายตัวนำบรรจุในกรงตาข่าย ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ Field mill และแผ่นวิลสัน เพื่อวัดค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากประจุตามลำดับ. การเปรียบเทียบจากความเร็วลม 0-10m/s พบว่า ค่าที่วัดทั้งสองมีค่าตรงกันกับผลคำนวณ และกราฟของทั้งสองค่ามีการเลื่อนของกราฟตามทิศทางของลม. ผลของแรงลมทำให้ความหนาแน่นประจุลดลงทางด้านต้นลม (upwind) สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจึงลดลงต่ำกว่าค่าทางด้านท้ายลม (downwind). กรณีที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงจากการเพิ่มแรงดันทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากความเร็วลมจะมีผลกระทบน้อยลง.

2.9 การวัดกระแสไอออนเนื่องจากโคโรนาดีสชาร์จ

ผลกระทบของโคโรนาดีสชาร์จในสายส่ง HVDC ทำให้เกิดความหนาแน่นของไอออนในอากาศระหว่างสายตัวนำและพื้นดินสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่น. การเคลื่อนที่ได้ของไอออนกลุ่มนี้ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแรงลม ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้บนพื้นดินหรือวัตถุที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งสามารถวัดค่าได้เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งอยู่บนระดับพื้นดินเรียกว่า แผ่นวิลสัน (Wilson plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.15. อุปกรณ์นี้ใช้หลักการสะสมประจุบนแผ่นระนาบโลหะ ร่วมกับวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าสถิต I ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electrometer) วัดได้เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J เฉลี่ยต่อพื้นที่ A ของแผ่นระนาบตามความสัมพันธ์ดังสมการนี้ [22].

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.15 การติดตั้ง Wilson plate วัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า [22]

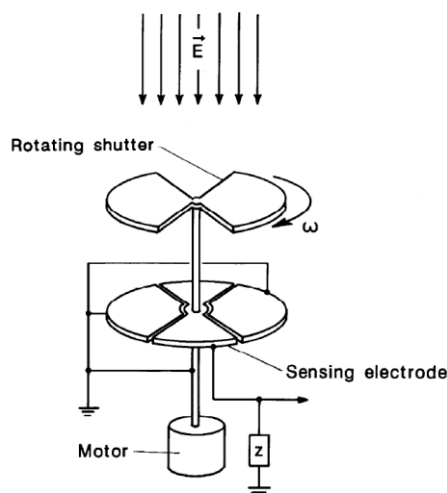
ขนาดของแผ่นระนาบที่นิยมใช้งานคือ $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ โดยมีการเพิ่มแถบป้องกัน (guard band) เพื่อลดผลกระทบความบิดเบี้ยวของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามแนวขอบของแผ่นระนาบ. การเพิ่มขนาดพื้นที่ แผ่นระนาบจะช่วยเพิ่มความไวในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเนื่องจากโอออนของสายส่ง HVDC ในพื้นที่กลางแจ้ง. การปรับลดขนาดช่องว่างระหว่างแผ่นระนาบและแถบป้องกัน ประกอบกับการสอบเทียบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยความต้านทานและเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงมาตรฐาน ช่วยลดความไม่แน่นอนของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้อีกทางหนึ่ง.

นอกเหนือจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าดิซาร์จแล้ว การวัดค่าสนามไฟฟ้าเป็นอีกข้อมูลหนึ่งที่ใช้แสดงผลของสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าของสายส่ง HVDC ได้เช่นกัน. อุปกรณ์วัดค่าสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ มิเตอร์วัดศักย์ไฟฟ้ากำเนิด (Generating voltmeters) หรือ “Field mills” และมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นสั่นสะเทือน (Vibrating plate electric-field meters). อุปกรณ์ทั้งสองประเภทนี้ ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางประจุไฟฟ้าบนโลหะอิเล็กทรอนิกส์แปลงเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้เช่นเดียวกัน.

Field mills ที่ใช้งานกันมีอยู่ 2 ชนิดคือ ชนิดชัตเตอร์ (shutter type) และชนิดทรงกระบอก (cylindrical type). มิเตอร์ชนิดชัตเตอร์ประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดต่อลงกราวด์หมุนได้และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดเหนี่ยวนำประจุแบบหนึ่งวางซ้อนอยู่บนแกนเดียวกันดังรูปที่ 2.16. การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรด จะทำให้มีกระแสไหลผ่านอิมพีแดนซ์ในรูปแบบคาบเวลาตามความเร็วรอบในการหมุน จึงเกิดศักย์ไฟฟ้าตรงคร่อมอิมพีแดนซ์และส่งสัญญาณนี้ไปยังชุดวงจรแปลงเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ดังสมการที่ (2.48). ข้อจำกัดของมิเตอร์ชนิดชัตเตอร์คือ การติดตั้งอุปกรณ์ควรวางอยู่ในระดับเดียวกันกับพื้นดิน หากต้องวัดค่าระดับความสูงเหนือพื้นดิน ควรติดตั้งอยู่บนแท่นวางที่มีการป้องกันประจุหรือกระแสเหนี่ยวนำอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อลดความผิดพลาดของผลการวัดค่าสนามไฟฟ้า.

$$i(t) = \frac{dq_s(t)}{dt} = \varepsilon_0 E \frac{da(t)}{dt} \quad (2.48)$$

เมื่อ	$i(t)$	คือกระแสเหนี่ยวนำตามเวลาของมิเตอร์ชนิดชัตเตอร์ (A)
	$q_s(t)$	คือประจุเหนี่ยวนำตามเวลาของมิเตอร์ชนิดชัตเตอร์ (C)
	$da(t)$	คือพื้นที่เหนี่ยวนำประจุของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดเหนี่ยวนำประจุตามเวลา (m^2)

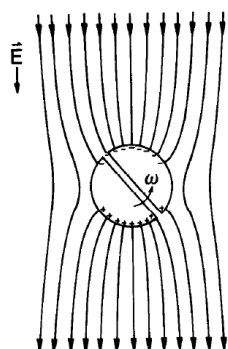


รูปที่ 2.16 แผนภูมิเค้าร่างของมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้า Field mills ชนิดชัตเตอร์ [22]

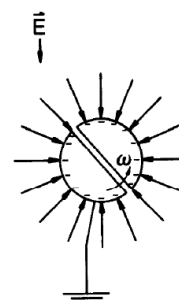
การออกแบบ Field mills ชนิดทรงกระบอกใช้หลักการผลรวมแบบทับซ้อน (superposition) ของประจุเหนี่ยวนำจากสายส่ง HVDC และประจุเหนี่ยวนำสมมาตรจากระนาบกราวด์ตามรูปที่ 2.17. การเหนี่ยวนำของประจุทั้งสองส่วนนี้เกิดขึ้นบนผิวของอิเล็กโทรดครึ่งทรงกระบอกรัศมี r_0 ความยาว L ซึ่งวางประกบกันอยู่ตามแนวความยาวและมีทิศทางการหมุนรอบแกนดังรูปที่ 2.18. หากความเร็วเชิงมุม ω ในการหมุนเป็นค่าคงที่ได้ก็ต่อเมื่อประจุเหนี่ยวนำสม่ำเสมอเต็มพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด. ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสเหนี่ยวนำ i_c ดังสมการ.

$$i_c = \frac{dq_c}{dt} = 4\epsilon_0 r_0 L E \omega \cos \omega t \quad (2.49)$$

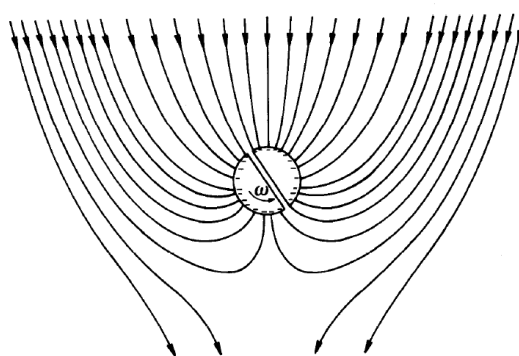
รูปที่ 2.19 แสดงมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นสั่นสะเทือน ประจุจะถูกเหนี่ยวนำผ่านช่องรับประจุไปยังแผ่นอิเล็กโทรดด้านล่างทำให้มีศักย์ไฟฟ้า V_s ส่งผลให้ตัวขับเคลื่อนเชิงกลสร้างแรงสั่นสะเทือนให้กับแผ่นอิเล็กโทรดด้านล่าง. การทำงานของมิเตอร์จึงตอบสนองโดยสร้างศักย์ไฟฟ้าลบ V_{fb} บนแผ่นอิเล็กโทรดด้านหน้าไปหักล้างศักย์ไฟฟ้า V_s เพื่อลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น. มิเตอร์วัดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นสั่นสะเทือนมีข้อจำกัดเช่นเดียวกันกับมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้า Field mills ชนิดชัตเตอร์ คือ ต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ระดับเดียวกันกับพื้นดิน และควรอยู่ในกล่องที่มีชีลด์ป้องกันสัญญาณรบกวน.



(ก) ประจุเหนี่ยวนำจากสายส่ง HVDC

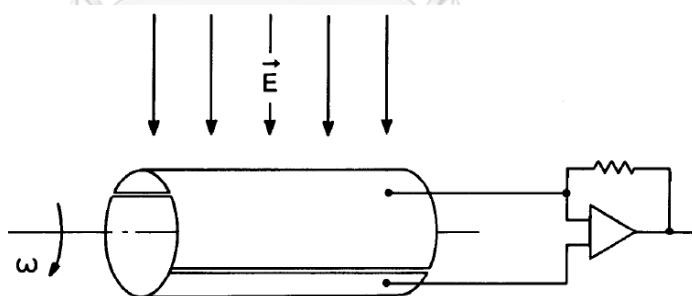


(ข) ประจุเหนี่ยวนำสมมาตรจากพื้นผิวดิน

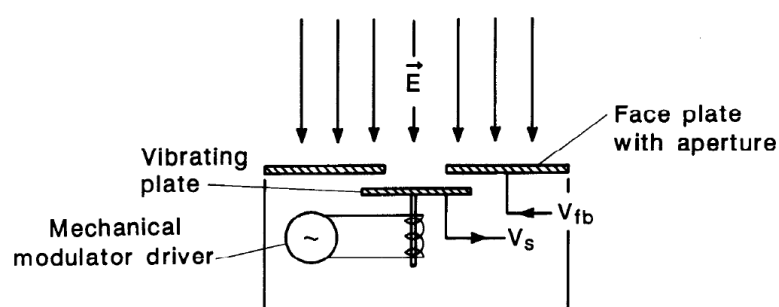


(ค) ผลรวมแบบทับซ้อน

รูปที่ 2.17 การเหนี่ยวนำของประจุบนผิวของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ [22]



รูปที่ 2.18 แผนผังของมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้า Field mills ชนิดทรานซิสเตอร์ [22]



รูปที่ 2.19 แผนผังของมิเตอร์วัดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นสั่นสะเทือน [22]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดกระแสไอออนเนื่องจากโคโรนาดีสชาร์จ

Chao Fang et al. [23] วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบกับการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนด้วยแผ่นวิลสันสำหรับสายส่ง HVDC ชนิดลดขนาดในห้องทดสอบ. การทดสอบใช้ขนาดความต้านทานที่ติดตั้งบนแผ่นวิลสันแตกต่างกันเท่ากับ 0.3, 1, 10 และ 20 M Ω . ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในระดับพื้นดินมีค่าเทียบเท่ากันทุกค่าความต้านทาน เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำเท่ากับ 50, 70 และ 90kV. ต่อมา จึงทดสอบปรับเปลี่ยนความสูงของแผ่นวิลสัน ความกว้างของแถบป้องกัน และความกว้างของอิเล็กโทรด (sensing electrode). ผลทดสอบที่วัดได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแนวโน้มสอดคล้องกับผลการจำลองซึ่งใช้วิธีการ CSM และข้อสันนิษฐานของ Deutsch. การวิเคราะห์ผลทดสอบสรุปได้ว่า ความหนาแน่นกระแสที่วัดได้ในระดับพื้นดินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความสูงของแผ่นวิลสันที่เพิ่มขึ้น. ความหนาแน่นกระแสที่วัดได้สูงผิดปกติเนื่องจาก ผลของขอบริมและความไม่เสถียรของค่าที่วัดได้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มความกว้างของแถบป้องกันและแผ่นวัด. การเลือกแผ่นวิลสันที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบชนิดลดขนาดควรมีอัตราส่วนของความกว้างของแถบป้องกันต่อความสูงของแผ่นวิลสันมากกว่า 5 และขนาดของแผ่นวัดควรกว้างมากกว่า 10 cm เมื่อสาย HV มีความสูงมากกว่า 50 cm.

Yongzan Zhen et al. [24] ทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกระแสไอออนด้วยอุปกรณ์แผ่นวิลสันของสายส่ง HVDC ชนิดลดขนาดทั้งขั้วเดียวและขั้วคู่ เมื่อติดตั้งอยู่ในอุโมงค์ลม. ความเร็วลมคงที่ซึ่งใช้ทดสอบมีค่าเท่ากับ 0, 3.5, 7 และ 10 m/s พัดตามแนวขวางกับสายตัวนำ HV แรงดันไฟฟ้าขั้วเดียว +42, +44, -42, -44 kV และแรงดันไฟฟ้าขั้วคู่ $\pm 32, \pm 35$ kV. แผ่นวิลสันจำนวน 1, 1, 6 แผ่น ติดตั้งอยู่ที่ด้านต้นลม, ใต้สายตัวนำและด้านท้ายลมตามลำดับ เพื่อส่งสัญญาณที่วัดได้ผ่านสายเคเบิลชิลด์ออกมายังอุปกรณ์บันทึกค่าซึ่งอยู่ด้านนอกของอุโมงค์ลม. ทั้งสายส่งขั้วเดียวและขั้วคู่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ระดับพื้นดินมีค่าสูงสุดขึ้นที่ด้านท้ายลมเมื่อเพิ่มความเร็วลม และตำแหน่งค่าสูงสุดสุดเลื่อนมาอยู่ที่ด้านท้ายลมเช่นกัน. สำหรับทางด้านต้นลมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงเกือบเป็นศูนย์. เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลการจำลองด้วยวิธี upstream-FEM แนวโน้มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกันตามความเร็วลมที่เพิ่ม. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบมีความแตกต่างเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์โคโรนา และปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการวัด.

Yong Cui et al. [25] ออกแบบระบบวัดความหนาแน่นกระแสไอออนร่วมกับระบบเครือข่ายตัวรับรู้ไร้สายหรือ Wireless Sensor Network (WSN) เพื่อเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบและติดตามสภาพแวดล้อมของสายส่ง HVDC. งานวิจัยได้รวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบกับผลวัดของกระแสไอออน ได้แก่ ความต้านทานจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความต้านทานที่ใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้า ความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นวัดและแถบป้องกันของแผ่นวิลสัน เป็นต้น. การเลือกขนาด

ของแผ่นวิลสันถูกจำลองด้วยวิธี FEM เพื่อคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ก่อนนำไปวิเคราะห์ความถูกต้องของค่ากระแสไอออนที่วัดได้ด้วยวงจรสมมูล R-C. ค่ากระแสไอออนที่วัดได้ในระดับนาโนแอมแปร์ ต้องถูกขยาย และแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนจะส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย Zigbee และบันทึกข้อมูลที่วัดได้โดยซอฟต์แวร์อัตโนมัติภาษาซี. ระบบเครือข่ายที่เลือกใช้เป็นโครงสร้างแบบ Digi-Mesh มีความน่าเชื่อถือสูง และเหมาะกับสภาพแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ด้วย. ระบบการวัดที่ออกแบบนั้น เมื่อนำไปสอบเทียบกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน พบข้อผิดพลาดในการวัดกระแสสูงที่สุดน้อยกว่า 3%. สุดท้ายงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกระแสไอออนใต้สายส่งทดสอบ $\pm 800\text{kV}$ HVDC โดยใช้ตัวรับรู้ไร้สายที่ออกแบบจำนวน 18 ตัว. ผลการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่วัดได้ในระดับพื้นดินที่ระยะห่างจากศูนย์กลางของสายส่ง 65 เมตรทางด้านสายขั้วลบ และ 35 เมตรทางด้านสายขั้วบวก พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ.

2.11 อุณหภูมิของอากาศรอบสายตัวนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบพาดในอากาศทั้ง HVAC และ HVDC มักใช้สายตัวนำตีเกลียวอลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้า (Aluminum conductor steel reinforced; ACSR). เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดอลูมิเนียม สายตัวนำจะร้อนขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียและยังร้อนเพิ่มขึ้นได้อีกจากความเข้มแสงอาทิตย์. ความร้อนที่เกิดขึ้นระบายออกจากสายตัวนำได้ด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติหรือลมพัดผ่าน และการแผ่รังสีความร้อนจากผิวสายตัวนำ. การถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำดังกล่าวแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.20. การใช้งานที่พิกัดกระแสสูงสุดทำให้อุณหภูมิของสายตัวนำสูงขึ้นถึง $75 - 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีผลให้อากาศโดยรอบมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้เช่นกัน. ความร้อนแต่ละรูปแบบของสายตัวนำหนึ่งหน่วยความยาว (W/m) คำนวณได้ตามมาตรฐาน IEEE738 ดังนี้ [26]

ความร้อน P_J จากกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

$$P_J = I^2 R_c \quad (2.49)$$

เมื่อ R_c คือความต้านทานของสายตัวนำ (Ω/m)

ความร้อน P_s จากแสงอาทิตย์

$$P_s = -42.2 + 63.8H_c - 1.9H_c^2 + (3.5 \times 10^{-2})H_c^3 \\ - (3.6 \times 10^{-4})H_c^4 + (1.9 \times 10^{-6})H_c^5 - (4.1 \times 10^{-9})H_c^6 \quad (2.50)$$

เมื่อ H_c คือมุมระหว่างพื้นราบกับแนวของแสงอาทิตย์ (องศา)

การพา $P_{c-natural}$ ความร้อนตามธรรมชาติ

$$P_{c-natural} = 3.645(\rho_{air})^{0.5}(d_c)^{0.75}(T_s - T_a)^{1.25} \quad (2.51)$$

เมื่อ d_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำ (เมตร)

T_s คืออุณหภูมิที่ผิวสายตัวนำ ($^{\circ}\text{C}$)

T_a คืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

การพา $P_{c-forced\ wind}$ ความร้อนด้วยลมพัด

$$P_{c-forced\ wind} = K_{angle} 0.754 Re^{0.6} k_f (T_s - T_a) \quad (2.52)$$

เมื่อ K_{angle} คือตัวประกอบของมุมกระทบระหว่างลมกับสายตัวนำ θ (องศา)

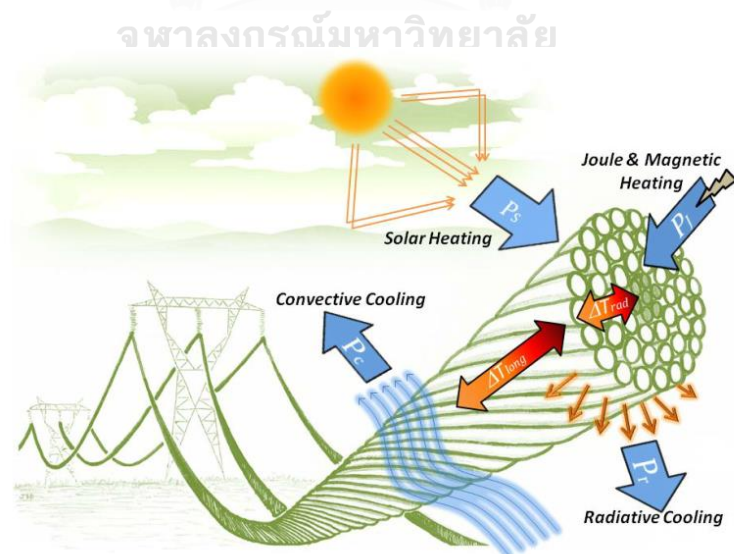
$$\text{โดยที่ } K_{angle} = 1.194 - \cos \theta + 0.194 \cos 2\theta + 0.368 \sin 2\theta$$

การแผ่รังสี P_r ความร้อน

$$P_r = 17.8 d_c \epsilon \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (2.53)$$

เมื่อ ϵ คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity)

สำหรับสายตัวนำใหม่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2–0.4 และสายตัวนำใช้งานแล้วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5–0.9



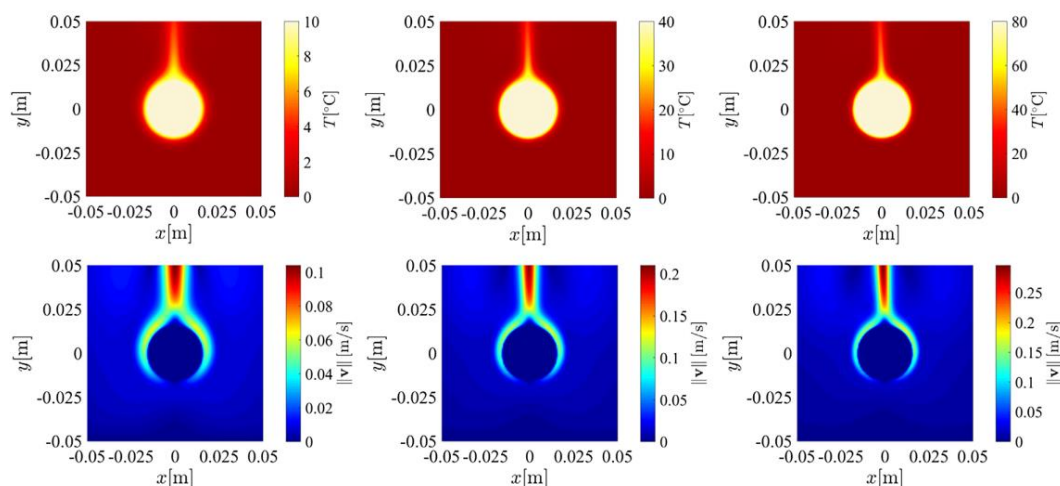
รูปที่ 2.20 การถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำในอากาศ [27]

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของสายตัวนำ

Irina Makhkamova et al. [28] เสนอวิธีประยุกต์ใช้เทคนิค CFD เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำไปยังสภาพแวดล้อมอากาศในสถานะคงตัว และสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา. เงื่อนไขความร้อนที่เกิดขึ้นของสายตัวนำชนิด Lynx กำหนดได้ด้วยขนาดกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมอากาศ และความเร็วลมในทิศทางขนานและตั้งฉากกับสายตัวนำ. อุณหภูมิและความเร็วลมคำนวณได้ด้วยการจำลองในซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT ซึ่งใช้วิธีเชิงเลข FVM แก่สมการควบคุมการไหลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงานและสมการแบบจำลองความปั่นป่วน. ผลการจำลองในสถานะคงตัวพบว่า การระบายความร้อนเนื่องจากความเร็วลม 15 m/s ในทิศตั้งฉากกับสายตัวนำสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 3.4 เท่า ซึ่งสูงกว่าลมในทิศทางขนาน. ผลการจำลองในสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่า ความเร็วลม 0.5 m/s เพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงค่าพิกัด 433 A ไปเป็น 866 A (2 เท่า) ใช้เวลา 29 นาที และ 12 นาที สำหรับลมในทิศตั้งฉากและขนานกับสายตัวนำ ตามลำดับ. ทิศทางของลมในแนวตั้งฉากช่วยลดอุณหภูมิของสายตัวนำได้ดีกว่าทิศทางขนานประมาณ 20 K. อุณหภูมิของสายตัวนำยังลดลงได้อีก เมื่อขนาดของความเร็วลมสูงขึ้นไม่เกิน 15 m/s. ผลการศึกษาในงานวิจัยสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของลมทั้งขนาดและทิศทาง มีผลกระทบโดยตรงกับการจ่ายโหลดกระแสไฟฟ้าด้วยสายตัวนำแบบพาดอากาศ. วิธีการวิเคราะห์ของงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและควบคุมการส่งจ่ายระบบกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะลมที่แปรผัน.

Milos Maksic et al. [29] อธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำแบบพาดอากาศในสถานะไม่มีลม โดยวิธีการจำลองทางความร้อนและของไหล (Thermo-fluid simulation) และวิธีวัดค่าอุณหภูมิของสายตัวนำในห้องทดสอบตามมาตรฐาน. แนวทางการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE และ CIGRE พิจารณาผลของการพาความร้อนตามธรรมชาติให้เป็นกรณีพิเศษ แต่มาตรฐาน IEC ไม่กล่าวถึงการพาความร้อนตามธรรมชาติ. การส่งความร้อนจากสายตัวนำผ่านอากาศจำลองหาค่าตอบได้ โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์, สมการความต่อเนื่อง. การลอยตัวของอากาศที่มีความร้อนสูงคำนวณได้ในแบบจำลองควบคุมไปด้วยวิธีการประมาณ Boussinesq. รูปที่ 2.21 แสดงผลการจำลองเชิงเลขของสายตัวนำพื้นที่หน้าตัด Al/Fe 490/65 ที่อุณหภูมิสายตัวนำสูงกว่าอากาศเท่ากับ 10, 40 และ 80 °C (รูปเรียงจากซ้ายไปขวา). อากาศที่มีอุณหภูมิสูงมีลักษณะเป็นชั้นหนาน้อยกว่า 1 cm โดยเกิดขึ้นที่ผิวสายตัวนำ ทำให้เกิดมีลมเป็นลักษณะเดียวกัน. การถ่ายเทพลังงานด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติซึ่งคำนวณได้จากมาตรฐาน IEEE และ CIGRE มีค่าสอดคล้องกับผลการจำลอง. อุณหภูมิที่ผิวสายตัวนำมีค่าต่ำกว่าผลการวัดได้ในห้องทดสอบ 2% และ 3% สำหรับสายตัวนำ Al/Fe 240/40 และ 490/65 ตามลำดับ. สายตัวนำที่ความเร็วลม

0.6 m/s (กำหนดใช้ให้เป็นสภาวะไม่มีลมตามมาตรฐาน) มีอุณหภูมิของสายตัวนำต่ำกว่าค่าในกรณีการพาความร้อนตามธรรมชาติ.



รูปที่ 2.21 ผลการจำลองอุณหภูมิและขนาดความเร็วลมของสายตัวนำในอากาศ [29]

Xiaoqian Ma et al. [30] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นอากาศต่อค่าสนามไฟฟ้าใต้สายส่ง HVDC ด้วยการทดสอบในห้องควบคุมสภาพอากาศ. สายตีเกลียวแกนเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 mm ติดตั้งที่ความสูง 80 cm เหนือแผ่นระนาบกราวด์ขนาด 6×3.9 m. อุปกรณ์ Field mills ที่มีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ จำนวนหลายตัวถูกติดตั้งอยู่กึ่งกลางแผ่นระนาบกราวด์. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดสอบปรับค่าอยู่ในช่วง $15\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $40\text{--}90\%$ ที่ความแม่นยำการวัด $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\pm 1\%$ ตามลำดับ. การทดสอบ HVDC เป็นแบบชั่วคราว กำหนดแรงดันไฟฟ้าให้มีทั้งขั้วบวกและลบ โดยมีขนาดเท่ากับ 52.8 และ 56.5 kV. กรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่พบว่า สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินมีค่าสูงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศ. กรณีที่อุณหภูมิคงที่พบว่า สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินสูงเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์เช่นกัน. ทั้งสองกรณีมีค่าสนามไฟฟ้าเนื่องจากโคโรนาของสายตัวนำขั้วลบเพิ่มขึ้นได้รวดเร็วกว่าขั้วบวก. ในกรณีที่ปรับเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์และลดอุณหภูมิอากาศซึ่งเป็นสภาพของอากาศตามธรรมชาติ สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายขั้วลบมีค่าสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นและลดลงในเวลาต่อมา แต่สนามไฟฟ้าจากสายขั้วบวกมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง. ปรากฏการณ์ของสายขั้วบวกอธิบายได้ว่า เป็นผลจากการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้ไอออนขั้วบวกมีขนาดใหญ่ขึ้น เคลื่อนที่ได้ช้าลง และสะสมจำนวนมากขึ้นในอากาศ. ดังนั้นโคโรนาดีสชาร์จจึงเกิดง่ายขึ้นที่สายขั้วบวก. ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายส่ง HVDC ควรพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศควบคู่กัน.

บทที่ 3

การจำลองด้วยวิธี FVM

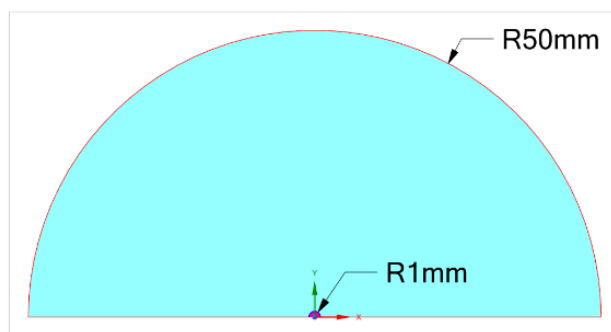
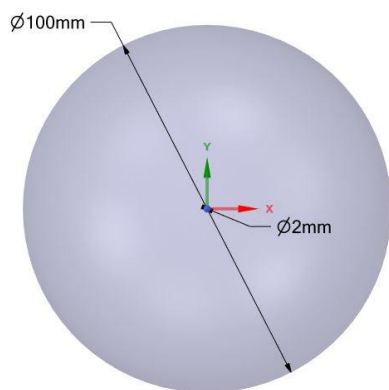
สำหรับการจำลองด้วยวิธี FVM ผู้วิจัยใช้สมการที่ (2.32) วิเคราะห์ปริมาณสเกลาร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลโดยใช้ปริมาณที่นิยามโดยผู้ใช้ (User defined scalars, UDS) ของโปรแกรม ANSYS FLUENT. การคำนวณคำตอบของสนามไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในอากาศใช้คำสั่งภาษา C ที่เขียนเพิ่มเติมให้เป็นฟังก์ชันนิยามโดยผู้ใช้ (User defined functions, UDF). รายละเอียดการตั้งค่าใช้งานสมการ UDS, UDF macros และความคลาดเคลื่อนคงค้าง (Residual error) ของโปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ก. วิธีการจำลองแบบ 2 มิติ ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 4 รูปแบบ. รูปแบบที่ 1 เป็นการจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าของสมการปัวซองเมื่อมีประจุค้าง (space charge) ในอากาศเพื่อเปรียบเทียบคำตอบของค่าศักย์ไฟฟ้ากับ ผลการวิเคราะห์ด้วยกฎของเกาส์. รูปแบบที่ 2 เป็นการจำลองการกระจายศักย์ไฟฟ้าของระบบสายตัวนำเหนือพื้นดินเพื่อเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้กับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีเงาประจุ. รูปแบบที่ 3 เป็นการจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดี่ยวชนิดลดขนาดที่ไม่มีและมีสายชีลด์ด้านล่าง (Underbuilt shield wire) เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน. รูปแบบที่ 4 เป็นการจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่ชนิดเต็มขนาด เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV ภายใต้เงื่อนไขของลมและอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน.

3.1 การจำลองหาคำตอบของสมการปัวซอง

รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้คือ ประจุไฟฟ้าในปริมาตรทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm วางอยู่ในอากาศปริมาตรทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ดังรูปที่ 3.1(ก). เราสามารถลดรูปให้เป็นแบบจำลอง 2 มิติ รูปครึ่งหน้าตัดทรงกลมได้ดังรูปที่ 3.1(ข). การแบ่งโดเมนใช้เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม (quadratic elements) วางเรียงอยู่ตามเส้นโค้งวงกลม ทำให้ได้เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (equipotential line) ราบเรียบมากขึ้น. ลักษณะการแบ่งโดเมนแสดงดังรูปที่ 3.1 (ค) โดยใช้ขนาดของเอลิเมนต์ในการคำนวณแต่ละครั้งเท่ากับ 0.125, 0.05 และ 0.02 mm.

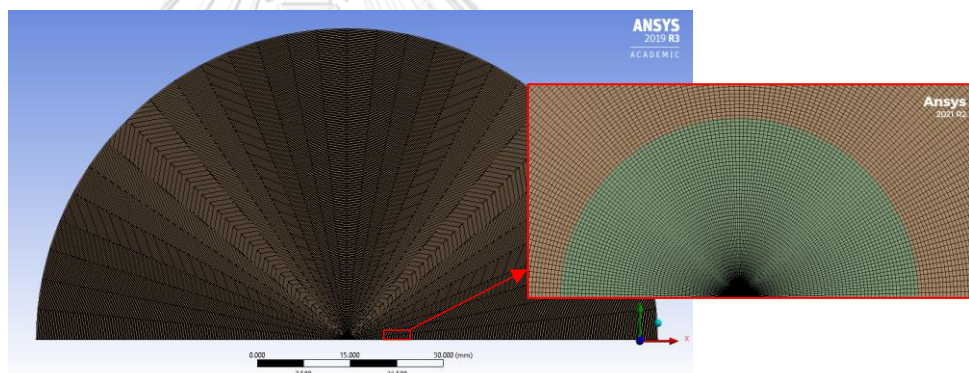
สมการปัวซองของศักย์ไฟฟ้า φ อยู่ในรูป

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$



(ก) แบบจำลองทรงกลม 3 มิติ

(ข) แบบจำลอง 2 มิติ รูปครึ่งหน้าตัดทรงกลม



(ค) การแบ่งโดเมนและเอลิเมนต์บริเวณประจุทรงกลม

รูปที่ 3.1 แบบจำลองหาคำตอบสมการปัวซองของประจุในอากาศ

การจำลองด้วย ANSYS FLUENT พิจารณาสมการของ ϕ_k ซึ่งเป็น UDS ลำดับที่ k [31]. ดัชนี i ในสมการที่ (3.2) เป็นการเลือกค่าคำนวณตามแนวแกน x และแกน y ของโปรแกรม เมื่อระบุ i เท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ.

$$\frac{\partial \rho_k \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_k u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} \quad (3.2)$$

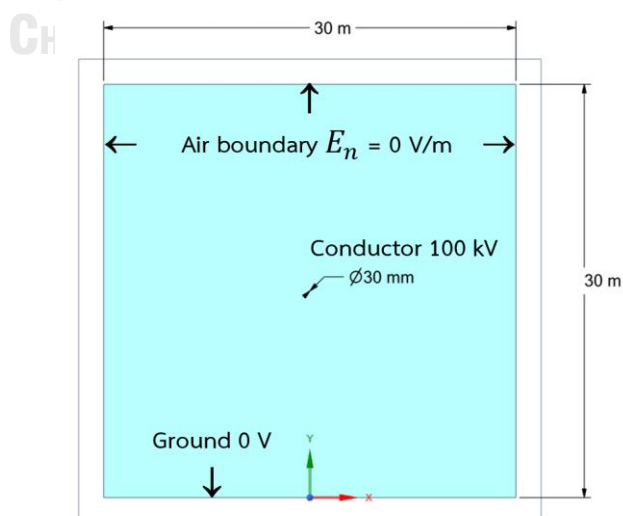
เมื่อพิจารณาสมการคงตัวและกำหนดให้ $\rho_k u_i \phi_k$ มีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้

$$-\Gamma_k \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x_i^2} = S_{\phi_k} \quad (3.3)$$

ดังนั้น เมื่อใช้ $\Gamma_k = \epsilon_0$, $S_{\phi_k} = \rho_v$ และ $\phi_k = \varphi$ เราจะสามารถใช้ ANSYS FLUENT หาคำตอบของสมการปัวซองได้.

3.2 การจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน

แบบจำลองเป็นสายตัวนำทรงกระบอกรัศมี $R = 15 \text{ mm}$ ที่ความสูงจากพื้นดิน $h = 15 \text{ m}$ และมีศักย์ไฟฟ้า 100 kV ดังรูปที่ 3.2(ก). การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตัวนำ ($\varphi = 100 \text{ kV}$), ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นดิน ($\varphi = 0 \text{ kV}$) และสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับขอบเขตอากาศ ($E_n = 0 \text{ V/m}$) เป็นเงื่อนไขขอบเขต. ความกว้าง $W \times$ ความสูง H ของขอบเขตอากาศที่ใช้เท่ากับ 30×30 , 45×37.5 , 52.5×41.25 , 90×60 , 120×75 และ $150 \times 90 \text{ m}^2$ เพื่อเปรียบเทียบกับคำตอบจากวิธีเงาประจุในหัวข้อ 2.3.3. การแบ่งโดเมนใช้เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม. ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 1 mm ที่บริเวณสายตัวนำและเท่ากับ $100 - 200 \text{ mm}$ ที่บริเวณอากาศ. จำนวนโหนด (nodes) และเอลิเมนต์ทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 3.1. การคำนวณด้วย ANSYS FLUENT กำหนด UDS เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1 โดยที่ $S_{\phi_k} = 0$. การคำนวณคำตอบเป็นแบบซ้ำจนได้คำตอบลู่อู่เข้าตามเงื่อนไขความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ.



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของสายตัวนำเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 3.1 จำนวนการแบ่งโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองที่ขนาดของขอบเขตอากาศต่างๆ

ระยะห่างจากสายตัวนำ ถึงขอบเขตอากาศ (m)	ขนาดของบริเวณอากาศที่จำลอง กว้าง (m) × สูง (m)	จำนวนโหนด	จำนวนเอลิเมนต์
15	30 × 30	293,362	97,370
22.50	45 × 37.50	528,852	175,720
26.25	52.5 × 41.25	679,855	225,975
45	90 × 60	435,524	144,660
60	120 × 75	704,587	234,201
75	150 × 90	1,040,380	345,978

การจำลองด้วย ANSYS FLUENT ได้คำตอบของศักย์ไฟฟ้าเท่านั้น. การหาค่าสนามไฟฟ้าต้องใช้คำสั่ง UDF เพิ่มเติม [32]. Macros ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณสนามไฟฟ้า และรายละเอียดของ UDF ที่เขียนจาก Macros ทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.1 มีดังนี้

- C_UDSI_G (c, t, i) [0] สำหรับคำนวณค่า user defined scalar gradient ตามแนวแกน x
- C_UDSI_G (c, t, i) [1] สำหรับคำนวณค่า user defined scalar gradient ตามแนวแกน y
- C_UDSI (c, t, i) สำหรับกำหนดค่าตัวแปร user defined scalar ชนิด cell
- DEFINE_EXECUTE_AT_END (name) สำหรับการเรียกฟังก์ชันที่กำหนดทุกรอบหรือทุกชั้นเวลา

3.3 การจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียว

การจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียวแสดงความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเชิงปริมาตรอยู่ในรูปผลคูณของ

$$\rho_v = \rho_{air} \rho_Q^* \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_{air} คือความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.225 kg/m^3

ρ_Q^* คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่อมวล (C/kg)

ความหนาแน่นของกระแสไอออนตามสมการที่ (2.22) และการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้าตามสมการที่ (2.23) สามารถปรับให้อยู่ในรูปของสมการ UDS ได้. รายละเอียดของสมการที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังต่อไปนี้

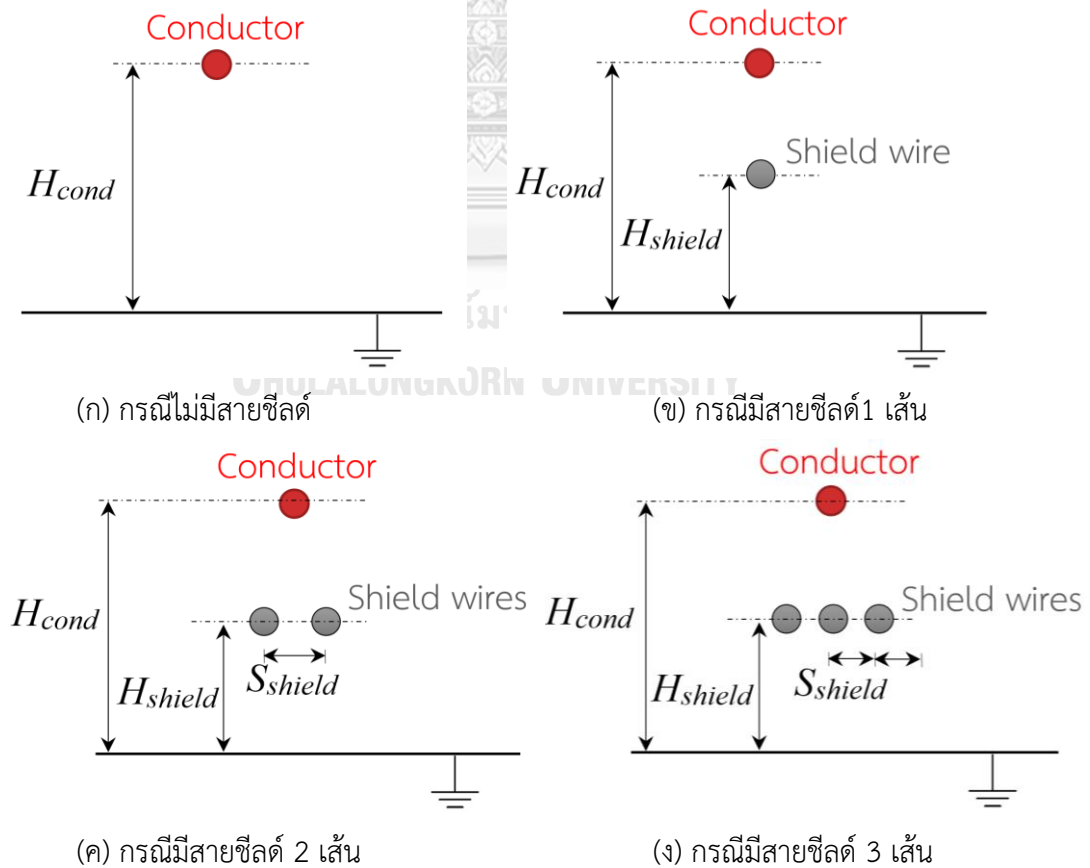
สมการความหนาแน่นของกระแสไอออน \mathbf{J} ในรูปของ ρ_Q^*

$$\mathbf{J} = \rho_{air} \mu \mathbf{E} \rho_Q^* - D_\rho \rho_{air} \nabla \rho_Q^* \quad (3.5)$$

สมการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้าได้เป็น

$$\frac{\partial \rho_{air} \rho_Q^*}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{air} \mu \mathbf{E} \rho_Q^* - D_\rho \rho_{air} \nabla \rho_Q^*) = 0 \quad (3.6)$$

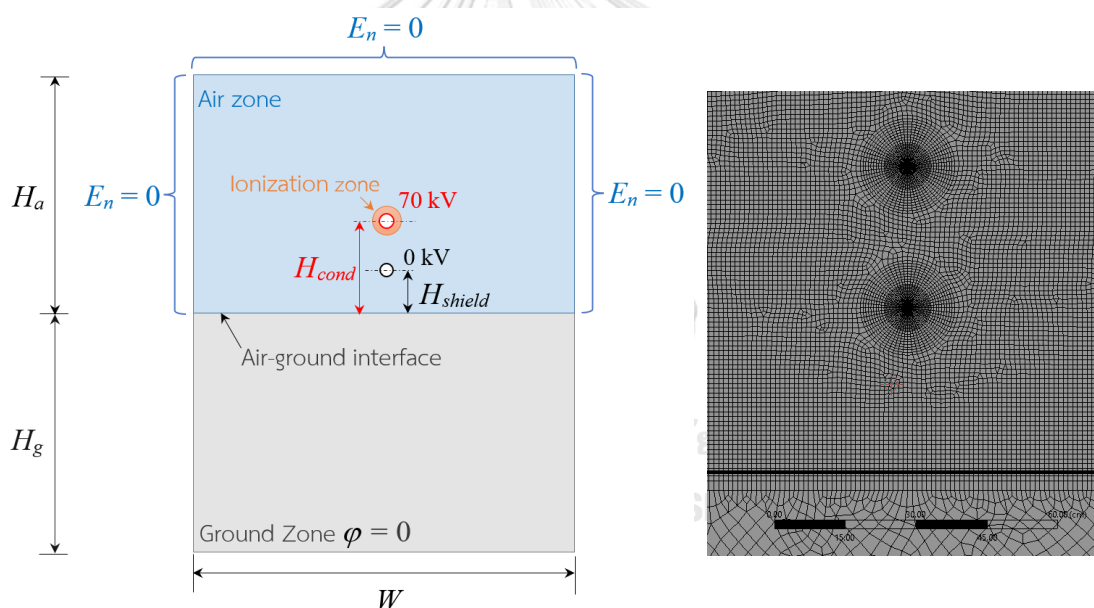
จากสมการที่ (3.6) และ (3.2) เมื่อให้ $\phi_k = \rho_Q^*$ จะได้ความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณด้วย ANSYS FLUENT เป็น $\rho_k = \rho_{air}$, $u_{i=0} = \mu E_x$, $u_{i=1} = \mu E_y$, $\Gamma_k = D_\rho \rho_{air}$ และ $S_{\phi_k} = 0$



รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดเรียงของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดี่ยวชนิดลดขนาด

รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียวชนิดลดขนาด. ขนาดรัศมีตัวแปรของสายตัวนำเท่ากับ 0.09 cm ความสูง H_{cond} ของสายตัวนำจากพื้นดินเท่ากับ 64.8 cm ดังรูปที่ 3.3(ก). รูปแบบการจำลองแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีไม่มีสายชีลด์, กรณีมีสายชีลด์ติดตั้งจำนวน 1 เส้น, 2 เส้น และ 3 เส้น. ความสูง H_{shield} ของสายชีลด์ และระยะห่าง S_{shield} ของสายชีลด์ แสดงดังรูปที่ 3.3(ข) ถึง 3.3(ง). ขนาดรัศมีของสายชีลด์เท่ากับสายตัวนำ และสายชีลด์ต่อลงดินจึงมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์. แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกของสายตัวนำเท่ากับ 70 kV.

รูปที่ 3.4(ก) แสดงภาพตัดขวางของสายตัวนำและสายชีลด์แบบ 2 มิติ. การแบ่งโดเมนประกอบกันเป็นบริเวณไอออนไนเซชัน (ionization zone) รอบผิวสายตัวนำ, บริเวณอากาศ (air zone) และบริเวณพื้นดิน (ground zone). ขอบเขตในการคำนวณให้สนามไฟฟ้า E_n ที่ตั้งฉากกับขอบเขตอากาศเท่ากับ 0 V/m, และในบริเวณพื้นดินศักย์ไฟฟ้า $\varphi = 0$ kV.



(ก) ขนาดแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น

(ข) ลักษณะเมชของแบบจำลอง

รูปที่ 3.4 แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วเดียวชนิดลดขนาด

การคำนวณทุกกรณีใช้เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม. แบบจำลองกว้าง $W = 800$ cm โดยใช้ความสูงขอบเขตอากาศ $H_a = 400$ cm และพื้นดิน $H_g = 1200$ cm ตามลำดับ. ขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 0.09 cm บริเวณสายตัวนำและสายชีลด์, 1 cm บริเวณอากาศ และ 3 cm บริเวณพื้นดิน

ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.4(ข). รายละเอียดของจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของแต่ละรูปแบบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2.

ตารางที่ 3.2 แสดงจำนวนการแบ่งโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองสายส่ง 70 kV HVDC

กรณีของการจำลอง	จำนวนโหนด	จำนวนเอลิเมนต์
ไม่มีสายชีลด์	1,308,019	435,125
มีสายชีลด์ 1 เส้น	1,312,039	436,358
มีสายชีลด์ 2 เส้น	1,316,030	437,795
มีสายชีลด์ 3 เส้น	1,317,077	438,130

การตั้งค่าโปรแกรมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามเวลา. ฟลักซ์ที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวปริมาตรควบคุมเท่ากับ $\rho_{air}\mu E$ ต้องใช้คำสั่ง UDF เพิ่มเติม. รายละเอียดของ UDF ที่เขียนจาก Macros, การตั้งค่าตัวแปรทางไฟฟ้าทั้งหมด และการใช้งาน UDF Macros แสดงไว้ในภาคผนวก ข.2 และ ข.3. UDF ที่ใช้ในการจำลอง มีดังนี้

- C_UDMI (c, t, i) สำหรับเก็บค่าตัวแปร user defined memory ชนิด cell
- C_R(c, t) สำหรับเรียกค่าความหนาแน่นของอากาศในการคำนวณ
- C_UDSI_G (c, t, i) สำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าจากสมการเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าสถิต
- DEFINE_UDS_UNSTEADY (name, c, t, i, apu, su) สำหรับตั้งค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- DEFINE_UDS_FLUX (name, f, t, i) สำหรับตั้งค่าฟลักซ์ที่ไหลผ่านพื้นที่ผิว
- DEFINE_SOURCE (name, c, t, dS, eqn) สำหรับตั้งค่า $S_{\phi_k} = \rho_v = \rho_{air}\rho_Q^*$ เพื่อหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าจากสมการปัวซอง
- DEFINE_EXECUTE_AT_END (name) สำหรับคำนวณและเก็บค่าตัวแปรสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไอออนตามสมการที่กำหนดในทุกชั้นเวลา
- DEFINE_PROFILE (name, t, position) สำหรับตั้งค่า air-ground interface boundary ให้ประจุสามารถไหลจากอากาศผ่านไปยังพื้นดินได้

โดยทั่วไป ประจุในอากาศที่เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จของสายส่ง HVDC จะเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดิน. เมื่อผู้วิจัยจำลองด้วยเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่บริเวณพื้นดินดังรูปที่ 3.4 ผู้วิจัยพบว่า ประจุไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ในพื้นดิน ทำให้ตำแหน่งรอยต่อระหว่างอากาศและพื้นดิน (Air-ground interface) เกิดประจุไฟฟ้าสะสมอยู่. ดังนั้น การจำลองจึงสมมติสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายบริเวณพื้นดิน D_g เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไหลจากอากาศลงสู่พื้นดินได้. การกำหนด D_g ระบุเป็นจำนวนเท่าของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย D_ρ บริเวณอากาศ โดยที่ $D_g = 10^6 D_\rho$ [33].

ขั้นตอนการจำลองแสดงได้ด้วยแผนผังในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าเริ่มต้นของทุกโดเมนในแบบจำลองเมื่อไม่มี

ประจุไฟฟ้า $\rho_{Q0}^* = 0$

ขั้นที่ 2 เพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเริ่มต้น $\rho_{Q0}^* = \rho_0 / \rho_{air}$ ที่บริเวณไอออนไนเซชัน

$$\rho_0 = \frac{E_{ground}}{E_c} \frac{8\varepsilon_0 \varphi_c (\varphi_c - \varphi_{cond})}{r_c H_{cond} \varphi_{cond} (5 - 4\varphi_c / \varphi_{cond})} \quad (3.7)$$

เมื่อ E_{ground} คือขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินจากการคำนวณในขั้นที่ 1

φ_c คือศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นโคโรนา

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่าตอบสนามไฟฟ้าของสมการปัวซองจากความหนาแน่นประจุไฟฟ้าในแบบจำลอง

ขั้นที่ 4 ใช้สมการที่ (3.6) คำนวณการเคลื่อนที่ของประจุไปยังตำแหน่งใหม่ ขนาดของ ρ_Q^* ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งใหม่เปลี่ยนไปตามค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้า

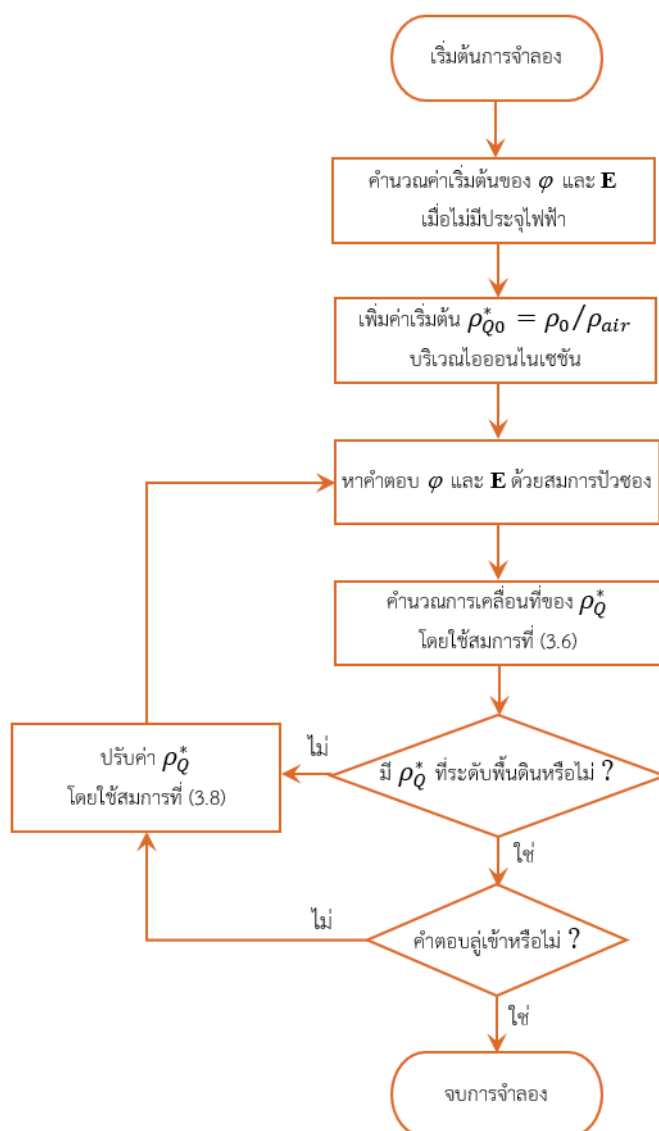
ขั้นที่ 5 ปรับค่า ρ_Q^* ที่บริเวณไอออนไนเซชันด้วยสมการที่ (3.8) เมื่อ E_t คือ ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณไอออนไนเซชันที่คำนวณได้ในขั้นเวลา t

$$\rho_{Q_{t+\Delta t}}^* = \rho_{Q_t}^* + \rho_{Q_t}^* \left(\frac{E_t - E_c}{E_t + E_c} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อ ดัชนีล่าง t ระบุขั้นเวลาปัจจุบัน (current time step) และ

$t + \Delta t$ ระบุขั้นเวลาถัดไป (next time step)

การหาคำตอบของแบบจำลองจะคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 3-5 จนมีความหนาแน่นประจุไฟฟ้าไหลจากสายตัวนำลงไปที่บริเวณพื้นดิน. การคำนวณหยุดเมื่อสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไอออนบริเวณพื้นดินเข้าสู่ค่าคงที่.



รูปที่ 3.5 ผังงานการจำลองในโปรแกรม

3.4 การจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วคู่

วิธีการจำลองสายส่งแบบขั้วคู่คล้ายกันกับวิธีของสายส่งแบบขั้วเดียว. การมีไอออนไนเซชันของประจุทั้งสองขั้ว ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเชิงปริมาตรในสมการที่ (3.4) จึงถูกแยกไปตามชนิดของประจุไฟฟ้าขั้วบวก ρ_{V+} และขั้วลบ ρ_{V-} และนำประจุมาแทนค่าลงในสมการที่ (2.26) และ (2.27)

ของความหนาแน่นกระแสไอออน \mathbf{J}_+ และ \mathbf{J}_- ตามลำดับ. เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรสำหรับตั้งค่า UDS ในโปรแกรมรายละเอียดการปรับปรุงของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงได้โดยนิยาม

$$\rho_{v+} = \rho_{air}\rho_{Q+}^* \quad (3.9)$$

$$\rho_{v-} = \rho_{air}\rho_{Q-}^* \quad (3.10)$$

กรณีขั้วบวก

เมื่อแทนค่า ρ_{v+} จากสมการที่ (3.9) ลงในสมการความหนาแน่นของกระแส \mathbf{J}_+

$$\mathbf{J}_+ = \rho_{v+}\mu_+\mathbf{E} - D_{\rho+}\nabla\rho_{v+} + \rho_{v+}\mathbf{w} \quad (3.11)$$

เมื่อแทน \mathbf{J}_+ ลงในสมการความต่อเนื่องของกระแสไอออน เราจะได้สมการการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าขั้วบวก

$$\rho_{air}\frac{\partial\rho_{Q+}^*}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_{air}\rho_{Q+}^*(\mu_+\mathbf{E} + \mathbf{w}) - \rho_{air}D_{\rho+}\nabla^2\rho_{Q+}^* = -R_{\rho}\frac{(\rho_{air})^2\rho_{Q+}^*\rho_{Q-}^*}{e} \quad (3.12)$$

เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.12) และสมการที่ (3.2) ของ UDS เราจะกำหนดให้

$$\begin{aligned} \phi_k &= \rho_{Q+}^* & \rho &= \rho_{air} & u_{i=0} &= \mu_+E_x + w_x & u_{i=1} &= \mu_+E_y + w_y \\ \Gamma_0 &= \rho_{air}D_{\rho+} & S_{\phi_k} &= -R_{\rho}\frac{(\rho_{air})^2\rho_{Q+}^*\rho_{Q-}^*}{e} \end{aligned}$$

กรณีขั้วลบ

เมื่อแทนค่า ρ_{v-} จากสมการที่ (3.10) ลงในสมการความหนาแน่นของกระแส \mathbf{J}_-

$$\mathbf{J}_- = \rho_{v-}\mu_-\mathbf{E} + D_{\rho-}\nabla\rho_{v-} - \rho_{v-}\mathbf{w} \quad (3.13)$$

เมื่อแทน \mathbf{J}_- ลงในสมการความต่อเนื่องของกระแสไอออน เราได้สมการการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าขั้วลบ

$$\rho_{air}\frac{\partial\rho_{Q-}^*}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_{air}\rho_{Q-}^*(\mu_-\mathbf{E} - \mathbf{w}) - \rho_{air}D_{\rho-}\nabla^2\rho_{Q-}^* = -R_{\rho}\frac{(\rho_{air})^2\rho_{Q+}^*\rho_{Q-}^*}{e} \quad (3.14)$$

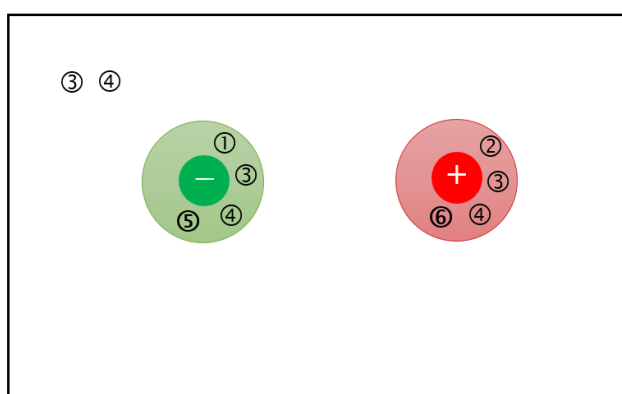
เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.2) ของ UDS เรากำหนดให้

$$\begin{aligned} \phi_k &= \rho_{Q-}^* & \rho &= \rho_{air} & u_{i=0} &= -\mu_-E_x + w_x & u_{i=1} &= -\mu_-E_y + w_y \\ \Gamma_k &= \rho_{air}D_{\rho-} & S_{\phi_k} &= -R_{\rho}\frac{(\rho_{air})^2\rho_{Q+}^*\rho_{Q-}^*}{e} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.3 การกำหนดตัวแปรของสายส่งแบบขั้วคู่ในโปรแกรม ANSYS FLUENT

k	ปริมาณ ϕ_k
0	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวกต่อมวล (ρ_{Q+}^*)
10	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วลบต่อมวล (ρ_{Q-}^*)
20	ผลรวมความหนาแน่นประจุไฟฟ้าทั้งสองขั้วต่อมวล (ρ_Q^*) เมื่อ $\rho_Q^* = \rho_{Q+}^* - \rho_{Q-}^*$
21	ศักย์ไฟฟ้า (φ)
22	สนามไฟฟ้าในแนวแกน x (E_x)
23	สนามไฟฟ้าในแนวแกน y (E_y)
24	ขนาดสนามไฟฟ้า ($ \mathbf{E} $)
25	ขนาดความหนาแน่นกระแสไอออน ($ \mathbf{J} $)

ตารางที่ 3.3 แสดง UDS ในโปรแกรม ANSYS FLUENT ของสายส่งแบบขั้วคู่สำหรับการคำนวณ. การเขียน UDF คล้ายกับสายส่งแบบขั้วเดียว แต่มีความแตกต่างในส่วน DEFINE_SOURCE ที่เพิ่มเติมจากพจน์ทางด้านขวามือของสมการที่ (3.12) และ (3.14). นอกจากนี้ระหว่างคำนวณ ผู้วิจัยยังพบว่า บางครั้งความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ (ϕ_0 และ ϕ_{10}) มีค่าติดลบทำให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าสูงผิดปกติ. ดังนั้น การจำลองสายส่งแบบขั้วคู่จึงเพิ่มคำสั่ง DEFINE_SOURCE ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วลบและขั้วบวก, บริเวณอากาศและบริเวณพื้นดิน เพื่อให้ได้คำตอบของสมการทั้งหมดตามรูปที่ 3.6 ดังนี้.



รูปที่ 3.6 การตั้งค่า DEFINE_SOURCE ในแต่ละบริเวณ

① negative_coronacharge_source สำหรับตั้งค่าเริ่มต้นและปรับค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วลบ ϕ_{10} ตามสมการที่ (3.7) และ (3.8) ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วลบ

② positive_coronacharge_source สำหรับตั้งค่าเริ่มต้นและปรับค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวก ϕ_0 ตามสมการที่ (3.7) และ (3.8) ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วบวก

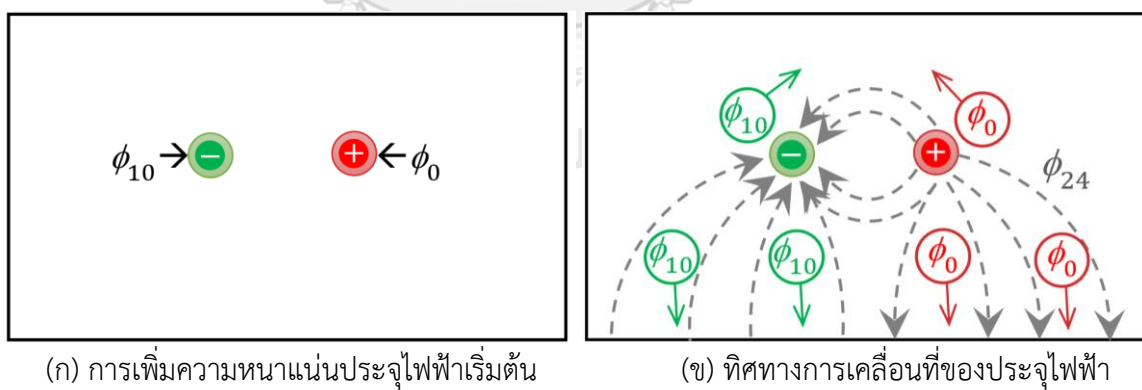
③ total_charge_source สำหรับตั้งค่าผลรวมความหนาแน่นประจุไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ϕ_{20} สำหรับคำนวณหาคำตอบศักย์ไฟฟ้า ϕ_{21} ด้วยสมการปัวซอง ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำทั้งสองขั้วและบริเวณอากาศ

④ recombine_charge_source สำหรับตั้งค่า S_{ϕ_k} ซึ่งเป็นพจน์ทางขวามือของสมการที่ (3.12) และ (3.14) สำหรับความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวก ϕ_0 และขั้วลบ ϕ_{10} ตามลำดับ ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำทั้งสองขั้วและบริเวณอากาศ

⑤ zeropos_source สำหรับตั้งค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวก ϕ_0 ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วลบมีค่าเป็นศูนย์ทุกรอบการคำนวณ

⑥ zeroneg_source สำหรับตั้งค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วลบ ϕ_{10} ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วบวกมีค่าเป็นศูนย์ทุกรอบการคำนวณ

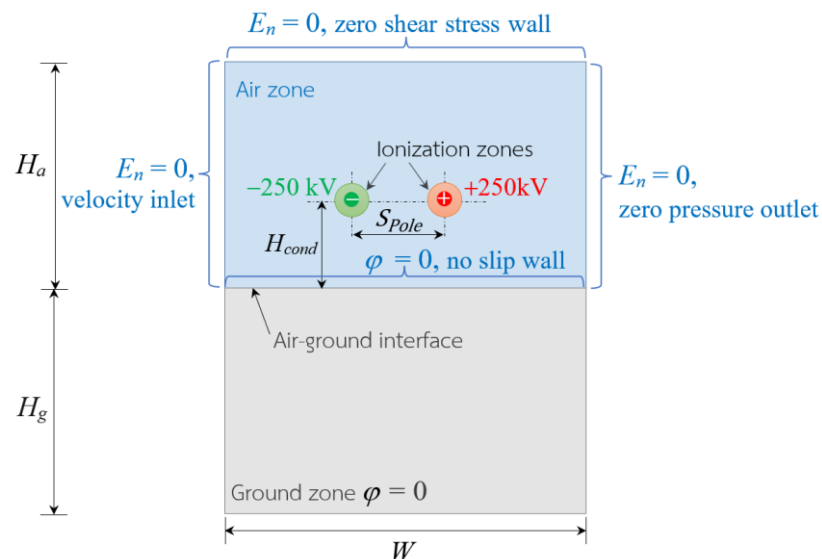
การตั้งค่าตัวแปรทางไฟฟ้าเหมือนกับสายส่งแบบขั้วเดียว โดยใช้ UDF Macros ทั้งหมดตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข.4.



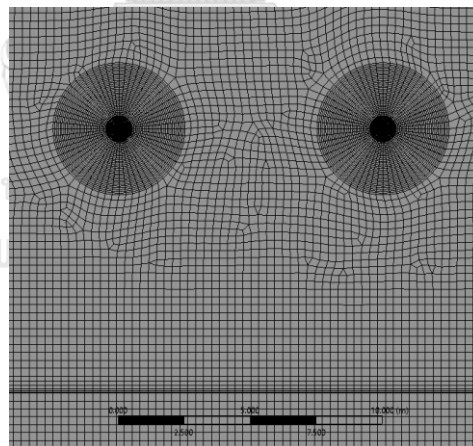
รูปที่ 3.7 การจำลองประจุไฟฟ้าของสายส่งแบบขั้วคู่

ขั้นตอนการจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ใช้แผนผังในรูปที่ 3.5 เช่นเดียวกับสายส่งแบบขั้วเดียว. เมื่อสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศรอบสายตัวนำสูงกว่า E_c ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขั้วบวก ϕ_0 และขั้วลบ ϕ_{10} ถูกเพิ่มในแบบจำลองที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำขั้วลบและบวกพร้อมกัน ดังรูปที่ 3.7(ก). การเคลื่อนที่ของ ϕ_0 และ ϕ_{10} ไปยังตำแหน่งใหม่คำนวณหาคำตอบได้โดยใช้

สมการที่ (3.12) และ (3.14). การจำลองถูกคำนวณซ้ำจนได้คำตอบของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไอออนบริเวณพื้นดิน ลู่เข้าสู่ค่าคงที่. การเคลื่อนที่ของ ϕ_0 และ ϕ_{10} ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า $\phi_{24} = (a_x \phi_{22} + a_y \phi_{23})$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ข).



(ก) ขนาดแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต

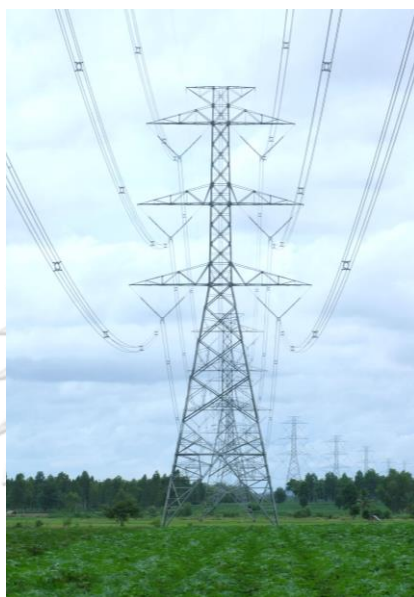


(ข) ลักษณะเมชของแบบจำลอง

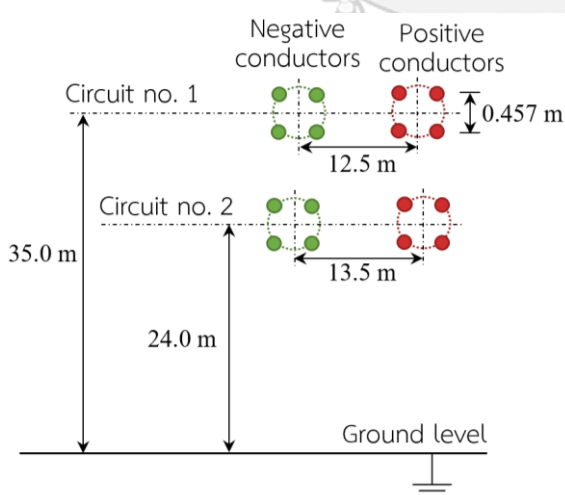
รูปที่ 3.8 แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 250 kV

รูปที่ 3.8 แสดงรูปแบบจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 250 kV ซึ่งใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลองในงานวิจัยอื่น [14]. ขนาดแบบจำลองกว้าง $W = 150$ m ความสูงขอบเขตอากาศ $H_a = 50$ m และพื้นดิน $H_g = 100$ m โดยมีเงื่อนไขขอบเขตแสดงดังรูปที่ 3.8(ก). ลมมีทิศทาง

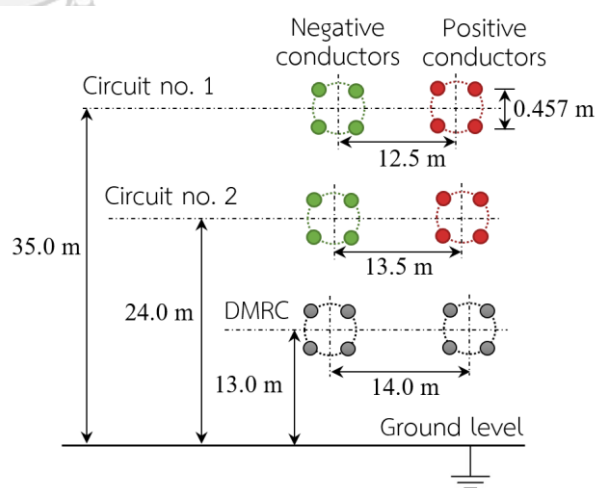
จากสายตัวนำขั้วลบไปยังขั้วบวก. สายตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 cm ความสูงสายตัวนำจากพื้นดิน $H_{cond} = 10$ m และระยะห่างระหว่างสายตัวนำต่างขั้ว $S_{pole} = 10$ m. การแบ่งโดเมนใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม โดยกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 0.75 cm บริเวณสายตัวนำและ 30 cm บริเวณอากาศและพื้นดิน. โดเมนทั้งหมดมีจำนวนโหนดเท่ากับ 803,074 และแบ่งออกเป็น 266,981 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.8(ข).



(ก) สายส่ง 500 kV HVAC



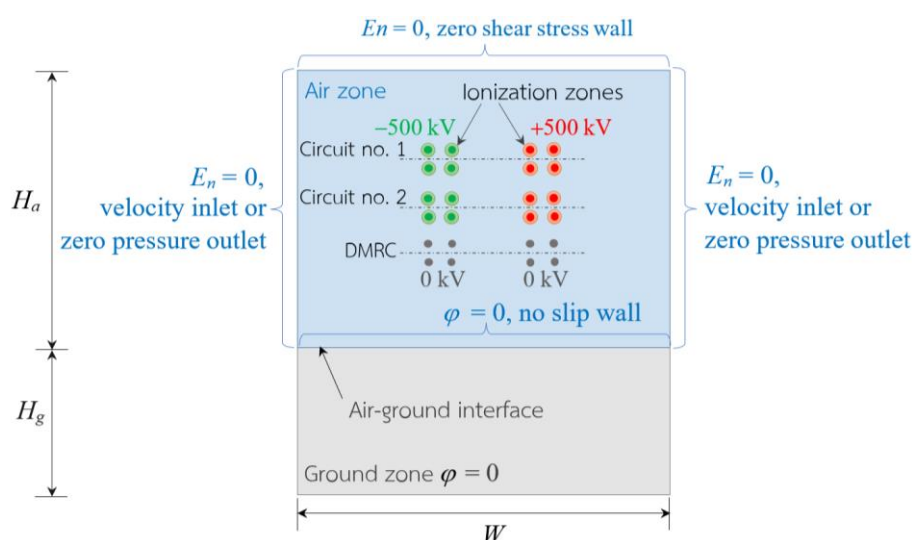
(ข) ± 500 kV HVDC without DMRC



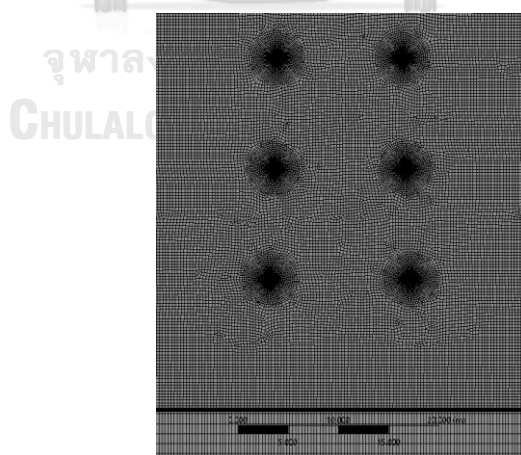
(ค) ± 500 kV HVDC with DMRC

รูปที่ 3.9 รูปแบบของสายส่ง ± 500 kV HVDC ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์สภาพอากาศในประเทศไทยนั้น รูปแบบที่ใช้เป็นโครงสร้างเดิมของสายส่ง 500 kV HVAC ในรูปที่ 3.9(ก). สายตัวนำ 1272 MCM ซึ่งใช้งานอยู่ในปัจจุบัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.391 cm จำนวน 4 เส้นต่อเฟส. การแปลงเป็นสายส่ง ± 500 kV HVDC ใช้สายตัวนำไฟฟ้า HVC ขั้วบวกที่เฟสบนและขั้วลบที่เฟสกลางจำนวน 2 วงจร. การจำลองพิจารณาสายตัวนำที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาไฟฟ้าแรงสูง (mid span). การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีสายตัวนำ DMRC ดังรูปที่ 3.9(ข) และกรณีที่มีสายเฟสล่างเป็นสายตัวนำ DMRC ดังรูปที่ 3.9(ค).



(ก) ขนาดแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต



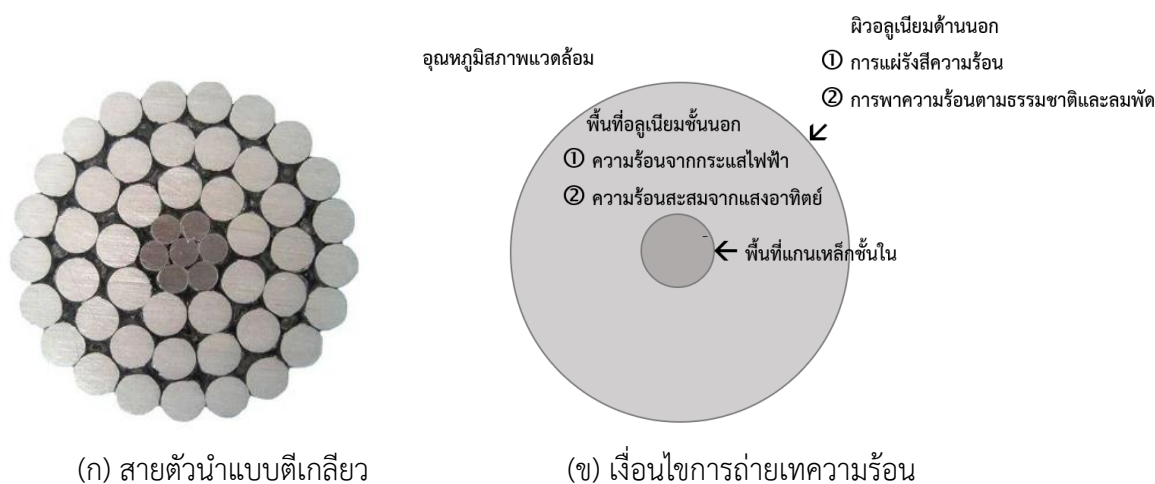
(ข) ลักษณะเมชของแบบจำลอง

รูปที่ 3.10 แบบการจำลองของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 500 kV

รูปที่ 3.10(ก) แสดงรูปแบบจำลองของสายส่งแบบชั่วคราว ± 500 kV. แบบจำลองกว้าง $W = 200$ m ความสูงขอบเขตอากาศ $H_a = 100$ m และพื้นดิน $H_g = 50$ m. การจำลองพิจารณาทิศทางของลมพัดจากสายตัวนำชั่วคราวและชั่วคราว สำหรับวิเคราะห์ค่าของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน. การกำหนดความเร็วลมของอากาศเป็นแบบคงตัวและไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของประจุไฟฟ้า. ความเร็วลมที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของประจุคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ซึ่งกำหนดโดยตั้งค่าใช้งาน “Flow equation” บนแถบ Solution ของโปรแกรม. สำหรับการจ่ายไฟใช้งานตามปกติ เราพิจารณาให้แรงดันไฟฟ้าของสายตัวนำ DMRC มีค่าเป็นศูนย์ได้. โดเมนทั้งหมดแบ่งด้วยเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม กำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 0.055 cm บริเวณสายตัวนำ, 30 cm บริเวณอากาศและ 100 cm บริเวณพื้นดิน ดังรูปที่ 3.10(ข). จำนวนโหนดและเอลิเมนต์เท่ากับ 1,049,465 โหนดและ 377,696 เอลิเมนต์ สำหรับกรณีที่ไม่มีสายตัวนำ DMRC และเท่ากับ 1,178,661 โหนด 434,866 เอลิเมนต์ สำหรับกรณีที่มีสายตัวนำ DMRC.

3.5 การจำลองวิเคราะห์อุณหภูมิสำหรับสายส่ง ± 500 kV

สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของสายส่งแบบชั่วคราว ± 500 kV สายตัวนำแบบตีเกลียวในรูปที่ 3.11(ก) สามารถแทนได้ด้วยหน้าตัดวงกลมของแกนเหล็กชั้นในและอะลูมิเนียมชั้นนอก. การถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำจากกระแสไฟฟ้า ความเข้มแสงอาทิตย์ การแผ่รังสี ลมพัดและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมแสดงได้ดังรูปที่ 3.11. อุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศโดยรอบในแบบจำลองคำนวณได้ในโปรแกรม ANSYS FLUENT ด้วยสมการอนุรักษ์พลังงานตามรายละเอียดการตั้งค่าความร้อนแสดงไว้ในภาคผนวก ข.5.



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของสายตัวนำ

ตารางที่ 3.4 แสดงเงื่อนไขของค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับคำนวณความร้อนจากกระแสไฟฟ้าและความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยสมการที่ (2.49) และ (2.50) ตามลำดับ. ค่าพลังงานความร้อนที่คำนวณได้ในตารางที่ 3.5 นำไปใช้เป็นเงื่อนไขการจำลองความร้อนของพื้นที่อะลูมิเนียมขนาด 860.34 mm^2 . การระบายความร้อนของสายตัวนำใช้การพาความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับในกรณีที่ไม่มีลมและกรณีที่มีลม ตามลำดับ. การจำลองกำหนดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่บริเวณผิวสายตัวนำเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสายตัวนำและอากาศได้.

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขค่าตัวแปรสำหรับคำนวณความร้อนของสายตัวนำ

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
ความต้านทานของสายตัวนำ 1272 MCM	$R_c = 0.05605 \text{ m}\Omega/\text{m}$
มุมระหว่างพื้นราบกับแนวของแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	$H_c = 0.6^\circ$
สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	$\epsilon = 0.6$
อุณหภูมิสภาพแวดล้อม	$T_a = 32^\circ\text{C}$

ตารางที่ 3.5 ค่าพลังงานความร้อนในการจำลองของสายตัวนำ 1272 MCM

กรณีของการจำลอง	ความร้อนจากกระแสไฟฟ้า		ความร้อนจากความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^3)
	กระแสไฟฟ้า (A)	ความร้อน (W/m^3)	
ไม่มีลม	642	27,161	29,912
มีลมความเร็ว 0.6 m/s	1037	70,524	

การจำลองวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของสายส่งกำหนดอุณหภูมิของอากาศเป็นแบบคงตัวและไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของประจุไฟฟ้า. ขนาดของแบบจำลองมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อการไหลอย่างอิสระ (free stream flow) ของอากาศในการถ่ายเทความร้อนสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิร่วมกับความเร็วลม. ขนาดแบบจำลองใช้ความกว้าง $W = 400 \text{ m}$ ความสูงของขอบเขตอากาศและพื้นดิน $H_a = 150 \text{ m}$ และ $H_g = 150 \text{ m}$ ตามลำดับ. เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมีขนาดเท่าเดิมที่บริเวณสายตัวนำ และปรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 60 cm ที่บริเวณอากาศและบริเวณพื้นดิน. จำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของโดเมนของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีสายตัวนำ DMRC จึงเพิ่มขึ้นประมาณ 30 – 45%. สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา E_c ที่บริเวณไอออนไนเซชันของสายตัวนำทั้งสองขั้วถูกปรับเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิโดยใช้สมการที่ (2.2) และ (2.3).

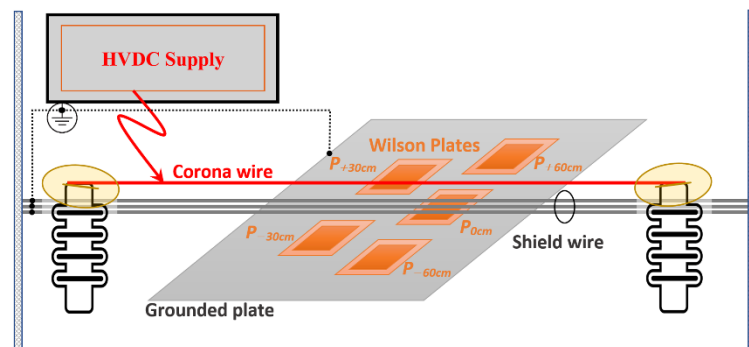
บทที่ 4

การทดลองวัดกระแสไอออนและอุณหภูมิ

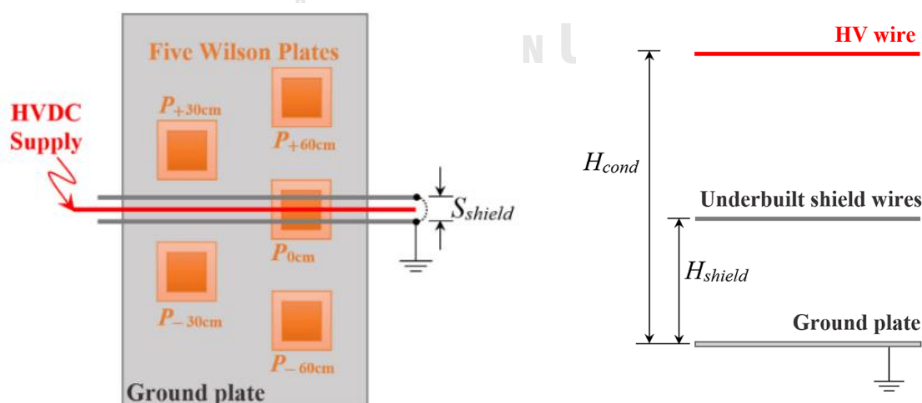
4.1 การวัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน

4.1.1 การติดตั้งอุปกรณ์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน ซึ่งเกิดจากโคโรนาดีสชาร์จของสายตัวนำในอากาศ. ผลการวัดค่ากระแสไอออนนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดี่ยวชนิดลดขนาด. รูปแบบการจัดเรียงสายส่งมีทั้งหมด 4 กรณี คือ กรณีไม่มีสายชีลด์, กรณีมีสายชีลด์ติดตั้งจำนวน 1 เส้น, 2 เส้น และ 3 เส้น. การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเป็นไปตามแผนภาพในรูปที่ 4.1



(ก) แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์



(ข) มุมมองด้านบนของชุดวัดแผ่นวิลสัน

(ค) มุมมองด้านข้าง

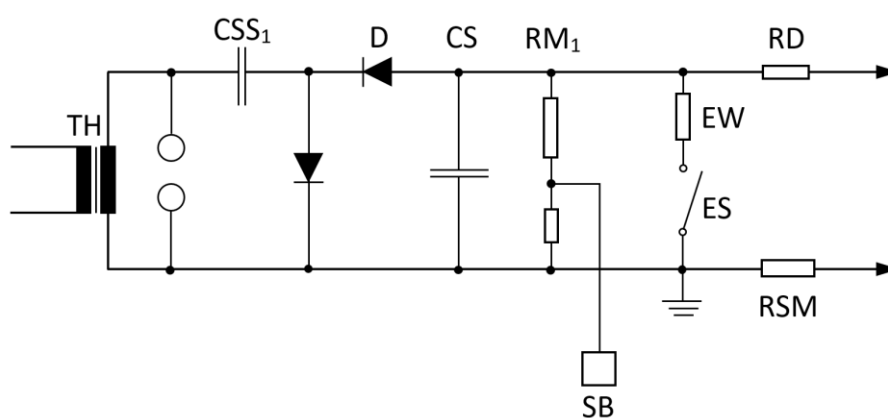
รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน



รูปที่ 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความหนาแน่นกระแสไอออนในห้องทดสอบ

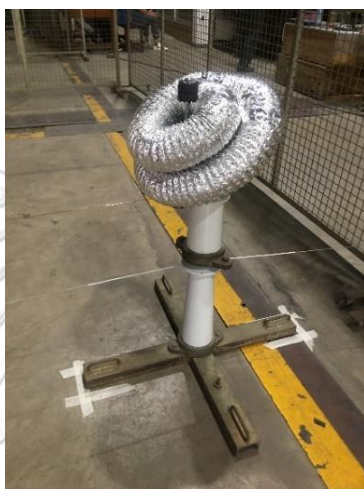
การวัดความหนาแน่นกระแสไอออนในห้องทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักในการทดสอบ ดังนี้

- 1) ชุดเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) สายตัวนำแรงดันไฟฟ้าสูง
- 3) สายซิลด์
- 4) ชุดวัดแผ่นวิลสัน
- 5) ระบายกราวด์
- 6) ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดความต้านทาน
- 7) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- 8) เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป



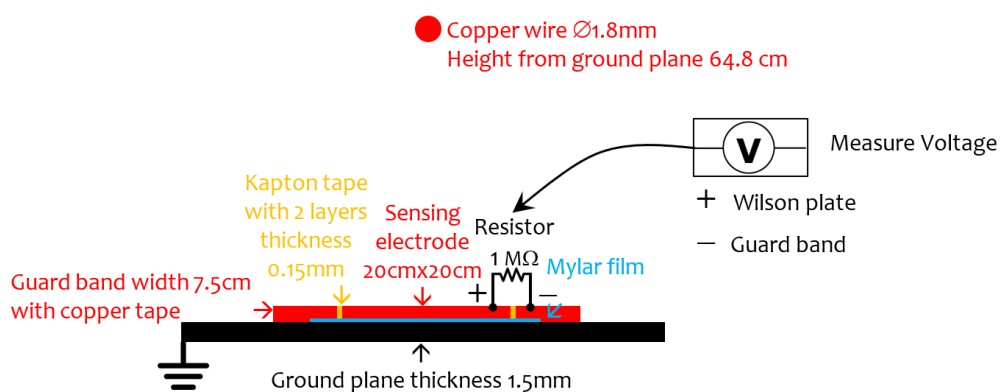
รูปที่ 4.3 วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

รูปที่ 4.3 แสดงวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ปรับค่าแรงดันทดสอบได้ 100/200 kV โดยใช้กล่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ารุ่น HAEFELY 273. ชุดเครื่องทดสอบประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (TH) 5 kVA 80 kV_{rms}, ตัวเก็บประจุไฟฟ้าคัปปลิง (CSS₁) 30 nF 100 kV_{DC}, ไดโอดเรียงกระแส (D) 100 kV_{DC} 20 mA, ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเรียงกระแส (CS) 15 nF 200 kV_{DC}, ตัวต้านทานวัดแรงดันไฟฟ้า (RM1) 800 M Ω 200 kV_{DC} เชื่อมต่อกับกล่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (SB) และส่วนของสวิตช์กราวด์ (RD, EW, RSM). แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสเพี้ยน (ripple voltage) น้อยกว่า $\pm 3\%$.



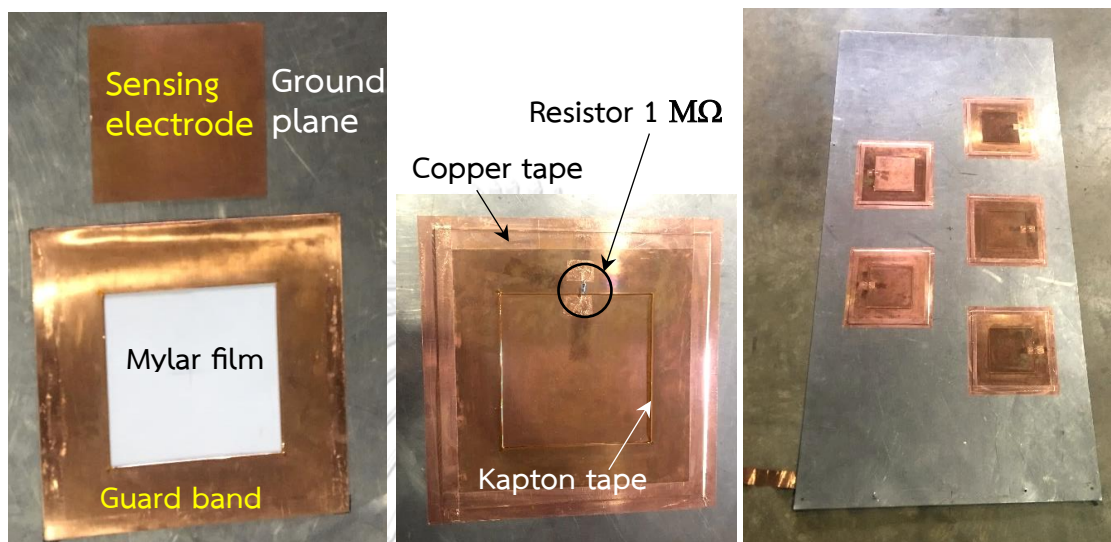
รูปที่ 4.4 การติดตั้งสายทองแดง

สายตัวนำแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นสายทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 mm ติดตั้งอยู่บนฉนวนลูกถ้วย. การติดตั้งวงแหวนโคโรนาและยางเพิ่มเติมที่สลักเกลียวยึดสายทองแดงดังรูปที่ 4.4 มีจุดประสงค์เพื่อกำบังบริเวณปลายแหลมซึ่งอาจสร้างประจุโคโรนาดีสชาร์จที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป. สายชีลด์เป็นสายเหล็กชุบสังกะสีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 mm และถูกต่อลงกราวด์.



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดวัสดุของแผ่นวิลสัน

ชุดวัดแผ่นวิลสันวัดกระแสไอออนสติดจากประจุโคโรนาดิสชาร์จ มีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.5. แผ่นวัดประจุและแถบป้องกันทำจากแผ่นทองแดงหนา 1 mm. แผ่นวัดประจุเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดแต่ละด้านเป็น 20 cm. แถบป้องกันเป็นกรอบสี่เหลี่ยมอยู่ด้านนอกมีขนาดแถบกว้าง 7.5 cm. ระบายกราวด์ของระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นแผ่นสแตนเลสความหนา 1.5 mm กว้าง 122 cm และยาว 244 cm.



(ก) ฉนวนรองใต้แผ่นวัดประจุ

(ข) แผ่นวิลสันแต่ละจุด

(ค) ชุดแผ่นวิลสัน 5 จุดวัด

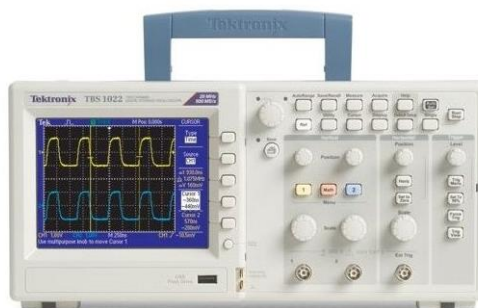
รูปที่ 4.6 ชุดแผ่นวิลสันที่ใช้ทดสอบ

รูปที่ 4.6 แสดงภาพวัสดุและการยึดประกอบชุดแผ่นวิลสันในแต่ละชั้น. แผ่นวัดประจุและระบายกราวด์ถูกแยกไม่ให้ออกถึงกันทางไฟฟ้าด้วยการใช้ฉนวนคั่นดังรูปที่ 4.6(ก). การฉนวนใช้ไมลาร์ฟิล์ม (Mylar film) ความหนา 0.25 mm ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดแต่ละด้านเท่ากับ 24 cm วางรองอยู่ใต้แผ่นวัดประจุ. ช่องว่างระหว่างแผ่นวัดประจุและแถบป้องกันมีขนาด 0.15 mm. การฉนวนของช่องว่างใช้แคปตอนเทป (Kapton tape) ความหนา 0.075 mm ติดที่ขอบแผ่นวัดประจุจำนวนสองชั้นดังรูปที่ 4.6(ข). แถบป้องกันถูกต่อลงกราวด์ และยึดติดกับแผ่นสแตนเลสด้วยการใช้เทปทองแดงติดโดยรอบแถบป้องกัน. ตัวต้านทานขนาด $1\text{ M}\Omega$ วางคร่อมช่องว่างระหว่างแผ่นวัดประจุและแถบป้องกันเพื่อให้กระแสไอออนสติดไหลผ่านและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า. ตำแหน่งแผ่นวิลสันทั้ง 5 จุดวัด คือ $P_0\text{ cm}$, $P_{-30\text{ cm}}$, $P_{+30\text{ cm}}$, $P_{-60\text{ cm}}$, $P_{+60\text{ cm}}$ ติดตั้ง อยู่บนระบายกราวด์แสดงได้ดังรูปที่ 4.6(ค).



รูปที่ 4.7 ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า

ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดความต้านทาน (Resistive divider) อัตราส่วน 400:5 แสดงในรูปที่ 4.7. ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าออกมาจากชุดเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.



(ก) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ FLUKE รุ่น 179 (ข) เครื่องออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TBS1022

รูปที่ 4.8 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ FLUKE รุ่น 179 ในรูปที่ 4.8 (ก) ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.ตำแหน่งที่วัดค่า คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดความต้านทานและที่ตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ ของแผ่นวิลสันแต่ละจุดวัด. แรงดันไฟฟ้าทดสอบอยู่ในย่านวัดแรงดันไฟฟ้า 600 mV ถึง 60 V มีความแม่นยำของเครื่องวัดเท่ากับ $\pm 0.09\%$ [34].

เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TBS1022 ในรูปที่ 4.8 (ข) ใช้สำหรับวัดและบันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ ของแผ่นวิลสันแต่ละจุดวัด.

ความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ $\pm 3\%$ [35]. เนื่องจากความต้านทานขาเข้า (Input impedance) ของเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปมีขนาด $1\text{ M}\Omega$ เมื่อต่อขนานกับตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ ของแผ่นวิลสัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ลดลงประมาณ 50%. ดังนั้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป จึงต้องปรับเพิ่มด้วยอัตราส่วนความต้านทาน R_1/R_2 ของแต่ละจุดวัดในตารางที่ 4.1 ก่อนจะนำไปคำนวณความหนาแน่นกระแสไอออน.

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความต้านทานของ Wilson plate ในแต่ละจุดวัด

จุดวัด	ค่าความต้านทานที่วัดได้ด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ($\text{M}\Omega$)	
	R_1 สำหรับกรณีที่ไม่มี เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปต่อขนาน	R_2 สำหรับกรณีที่มี เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคปต่อขนาน
$P_{0\text{ cm}}$	1.023	0.5054
$P_{-60\text{ cm}}$	1.023	0.5055
$P_{+60\text{ cm}}$	1.020	0.5048
$P_{-30\text{ cm}}$	1.014	0.5035
$P_{+30\text{ cm}}$	1.074	0.5177

4.1.2 วิธีการวัดความหนาแน่นกระแสไอออน

การทดสอบวัดความหนาแน่นกระแสไอออนมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มต้นวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ ขณะไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อบันทึกเป็นแรงดันไฟฟ้าพื้นหลัง (background voltage).
- 2) ปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขั้วบวกที่ชุดควบคุมเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจนแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่สายตัวนำทองแดงเท่ากับ 70 kV.
- 3) วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ ที่จุดวัด $P_{0\text{ cm}}$ ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์และบันทึกค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป.
- 4) ปรับลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ชุดควบคุมให้มีค่าเป็นศูนย์ และดิสชาร์จประจุตกค้างบนแผ่นวิลสันลงกราวด์ทุกแผ่น.
- 5) ย้ายจุดวัดใหม่และทำซ้ำขั้นตอน 1) ถึง 4) จนครบทั้ง 5 จุดวัด สำหรับการจัดเรียงสายส่งแต่ละรูปแบบ.
- 6) ความหนาแน่นกระแสไอออนเฉลี่ยของแต่ละจุดวัดคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$J_{avg} = \frac{V_{avg}}{S \times R} \quad (4.1)$$

เมื่อ V_{avg} คือแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป
 S คือพื้นที่ของแผ่นวัดประจุเท่ากับ 0.04 m^2
 R คือค่าความต้านทานเท่ากับ $1 \text{ M}\Omega$.

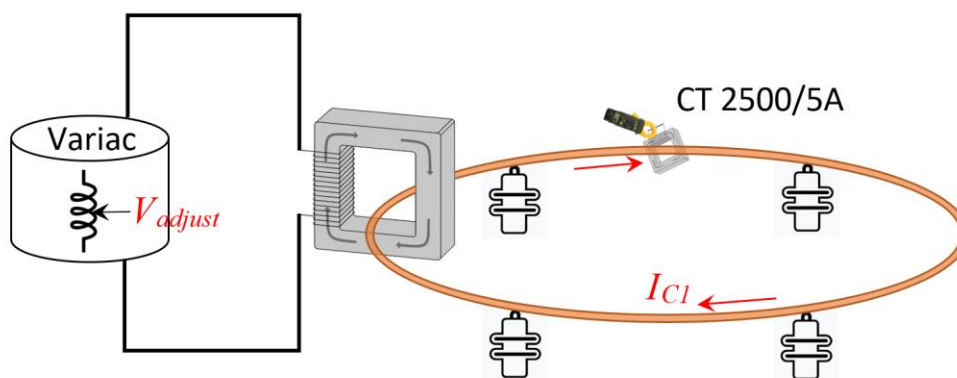
4.2 การวัดอุณหภูมิของสายตัวนำ

4.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

การทดสอบนี้วัดอุณหภูมิของสายตัวนำเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้กับผลคำนวณตามมาตรฐาน IEEE738 และผลการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT. รูปแบบการติดตั้งสายตัวนำในห้องทดสอบมีอยู่ 3 กรณี ดังนี้

1) สายตัวนำ 1 เส้น

กรณีสำหรับพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้อุณหภูมิของสายตัวนำ 1272 MCM เท่ากับ 75°C (อุณหภูมิสูงสุดของสายตัวนำ ACSR ที่ใช้งานต่อเนื่องได้ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย). สายตัวนำตีเกลียวอะลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้าวางเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 323 cm อยู่บนลูกถ้วยสูงจากพื้น 38 cm . สายตัวนำวางคล้องผ่านหม้อแปลงเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามแผนภาพรูปที่ 4.9. กระแสไฟฟ้าทดสอบเลือกปรับขนาดได้โดยใช้หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน. การติดตั้งอุปกรณ์ของการทดลองกรณีสายตัวนำ 1 เส้น แสดงได้รูปที่ 4.10.



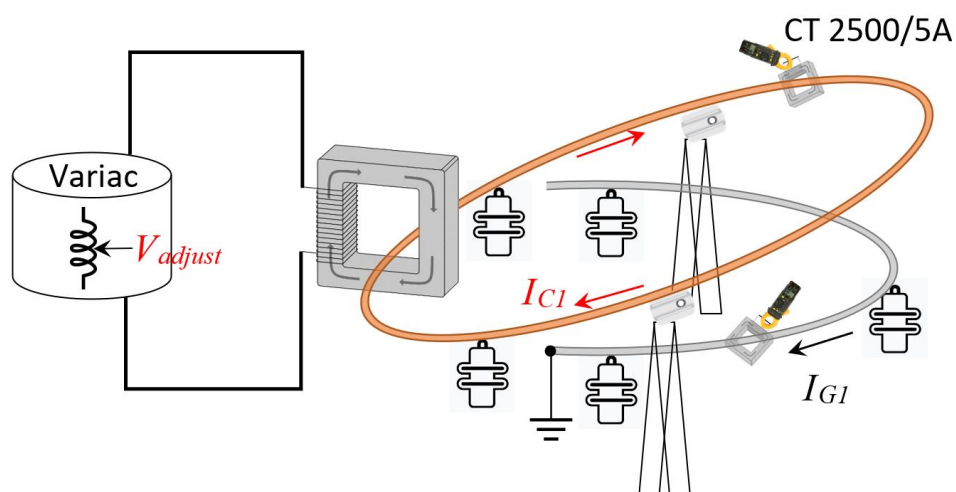
รูปที่ 4.9 แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น



รูปที่ 4.10 การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น

2) สายตัวนำ 1 เส้น ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง.

กรณีสำหรับพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศโดยรอบ เมื่อมีและไม่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง. สายตัวนำด้านบนจัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 323 cm วางให้สูงจากพื้น 92 cm. สายตัวนำด้านบนมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงตามแผนภาพรูปที่ 4.11. สายตัวนำด้านล่างวางบนลูกถ้วยสูงจากพื้น 38 cm และจัดวางให้ขนานกับสายตัวนำด้านบน. ปลายทั้งสองด้านของสายตัวนำด้านล่างวางแยกกัน โดยมีปลายด้านหนึ่งต่อลงกราวด์. การติดตั้งอุปกรณ์ของการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.12.



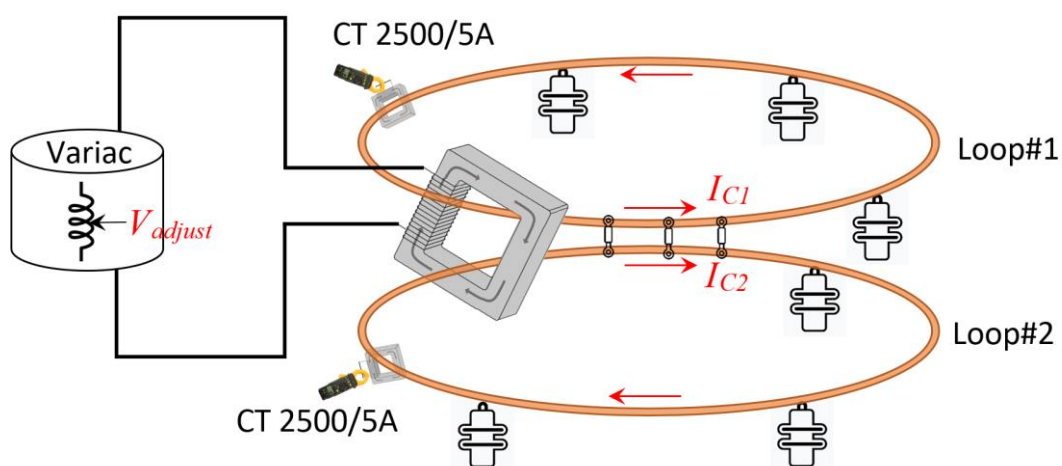
รูปที่ 4.11 แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 4.12 การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 1 เส้น ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง

3) สายตัวนำ 2 เส้น.

กรณีสำหรับพิจารณาอุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศโดยรอบ เมื่อติดตั้งสายตัวนำ 2 เส้น.สายตัวนำจัดเป็นวงกลมจำนวนสองวง วางบนลูกถ้วยสูงจากพื้น 38 cm. สายตัวนำทั้งสองวงทดสอบจ่ายกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงในทิศทางเดียวกันตามแผนภาพการติดตั้งในรูปที่ 4.13. สายตัวนำสองวงเชื่อมต่อกันด้วยอุปกรณ์คันสายระยะห่าง 40 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.14.



รูปที่ 4.13 แผนภาพอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 2 เส้น



รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์กรณีสายตัวนำ 2 เส้น

การทดสอบวัตถุอุณหภูมิประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

- 1) เครื่องควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ
- 2) หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน (Variac)
- 3) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบแห้ง (Dry type transformer)
- 4) สายตัวนำตีเกลียวอะลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้าขนาด 1272 MCM
- 5) หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า (Current transformer)
- 6) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบแคลมป์
- 7) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer)
- 8) กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal camera)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก) เครื่องควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า



(ข) หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน

รูปที่ 4.15 อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูง

เครื่องควบคุมออกแบบวงจรโดย High Voltage Technology Co., Ltd. ใช้ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับระหว่างทดสอบสายตัวนำแสดงดังรูปที่ 4.15(ก). ขนาดของกระแสไฟฟ้าปรับได้ที่หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน 1 เฟส TSB-50M, Voltac พิกัด 10 kVA, 50 A ดังรูปที่ 4.15(ข).



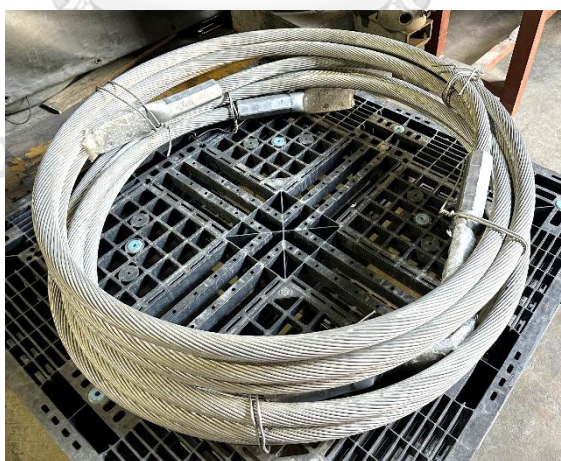
(ก) อุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้า



(ข) การต่อแทปหม้อแปลง

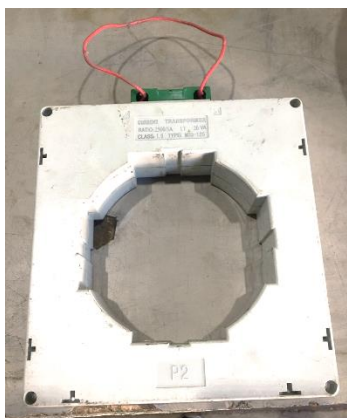
รูปที่ 4.16 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง 1 เฟส

หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบแห้ง 1 เฟส มีพิกัด 10 kVA, 38.46 A แสดงดังรูปที่ 4.16(ก). เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 260 V ความถี่ 50 Hz จะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกเป็น 1.3/2.6/5.2 V ขึ้นกับการเลือกต่อแทปหม้อแปลงในรูปที่ 4.16(ข). ในการทดสอบนี้เลือกแรงดันไฟฟ้าขาออกสำหรับทดสอบเท่ากับ 5.2 V.



รูปที่ 4.17 สายตัวนำตีเกลียวอะลูมิเนียมเสริมเหล็ก

รูปที่ 4.17 แสดงสายตัวนำตีเกลียวอะลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้าขนาด 1272 MCM ความยาวประมาณ 10 เมตร. ปลายสายตัวนำต่อเข้ากับอุปกรณ์เข้าสายแบบบีบ (compression dead end) เพื่อใช้ยึดสายตัวนำจัดให้เป็นวงกลมได้.



(ก) หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า



(ข) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบแคลมป์

รูปที่ 4.18 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า

หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า MSQ-125 มีพิกัด 20VA ใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่สายตัวนำ. อัตราส่วนกระแสวัดได้ 2500/5 A ความแม่นยำ Class 1.0 แสดงดังรูปที่ 4.18(ก). เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบแคลมป์ 3283, Hioki ใช้อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า, เครื่องควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า และหม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้า. ความแม่นยำของเครื่องวัดในรูปที่ 4.18(ข) ช่วงย่านวัดกระแสไฟฟ้า 10 A เท่ากับ $\pm 1\%$ [36].



(ก) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด



(ข) กล้องถ่ายภาพความร้อน

รูปที่ 4.19 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) FLUKE 66 ในรูปที่ 4.19(ก) ใช้วัดอุณหภูมิที่บริเวณผิวสายตัวนำขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าทดสอบ โดยที่ระยะห่างของจุดวัดไม่เกิน 5 m. ความแม่นยำในย่านวัด 23 – 510 °C เท่ากับ $\pm 1\%$ [37]. กล้องถ่ายภาพความร้อน

1040, FLIR ในรูปที่ 4.19(ข) ใช้บันทึกภาพอุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศโดยรอบขณะทดสอบ. ความแม่นยำในย่านวัด 5 – 150 °C เท่ากับ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ [38].

4.2.2 วิธีการวัดอุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศรอบสายตัวนำ

การทดสอบวัดอุณหภูมิมีขั้นตอนดังนี้

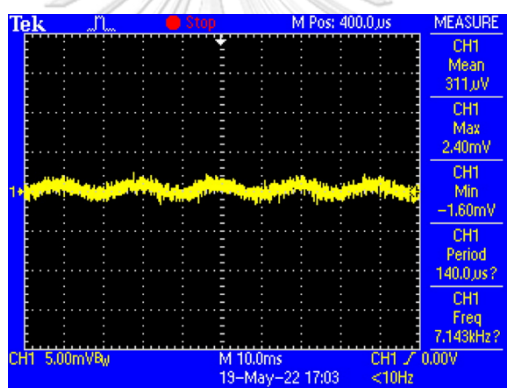
- 1) บันทึกอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิเริ่มต้นของสายตัวนำก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดหรือกล้องถ่ายภาพความร้อน.
- 2) เปิดเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ. พิกัดกระแสไฟฟ้าของสายตัวนำ 1272 MCM อยู่ในช่วง 1000 - 1200 A. ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของสายตัวนำ I_{C1} และ I_{C2} ที่เครื่องวัดแบบแคลมป์ จึงควรมีค่าประมาณ 2.0 - 2.4 A.
- 3) จ่ายกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสายตัวนำ. เมื่ออุณหภูมิคงที่จึงทำการวัดค่าอุณหภูมิของสายตัวนำขณะที่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายอยู่ ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดหรือกล้องถ่ายภาพความร้อน.

บทที่ 5

ผลการวัดกระแสไอออนและอุณหภูมิ

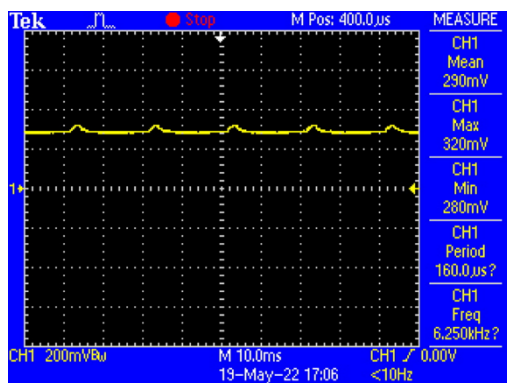
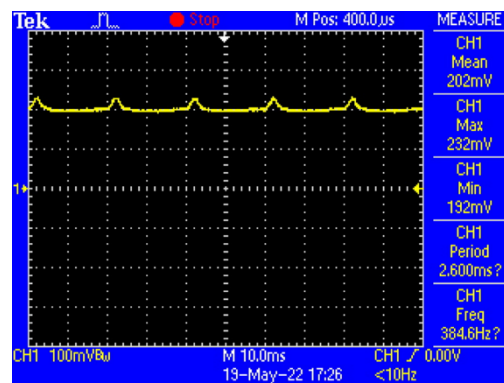
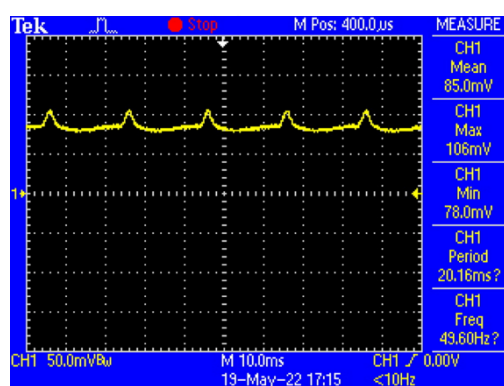
5.1 ผลการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนและการอภิปรายผล

รายละเอียดผลของค่าแรงดันไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไอออนที่ได้จากการทดลอง แสดงอยู่ในภาคผนวก ค. สภาพแวดล้อมของการทดลองเป็นแบบปิด ไม่มีลมพัด มีความชื้นสัมพัทธ์ 52–63 %RH, อุณหภูมิ 31–33 °C, ความดันบรรยากาศ 1003–1007 hPa. เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวัดค่าแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานที่ชุดแผ่นวิลสันได้อยู่ในช่วง 0.48–0.77 mV คำนวณเป็นความหนาแน่นกระแสไอออนได้ 0.01–0.02 $\mu\text{A}/\text{m}^2$. สัญญาณแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานแสดงในรูปที่ 5.1 เป็นคลื่นรบกวนคล้ายคลื่นไซน์.



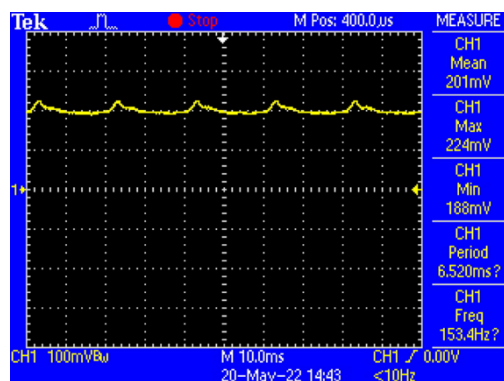
รูปที่ 5.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน

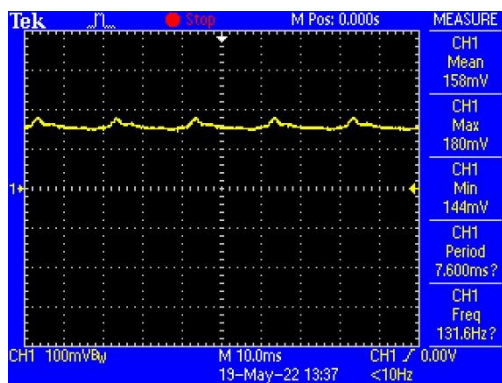
การทดสอบเริ่มได้ยินเสียงโคโรนาจากอุปกรณ์ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 40 kV. เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 70 kV สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นเส้นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่มเกิดขึ้นเป็นคาบเวลาใกล้เคียงกันดังรูปที่ 5.2(ก) ถึง 5.2(ค). กรณีไม่มีสายซิลด์ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของจุดวัดและสายตัวนำ โดยมีค่าจากสูงไปต่ำเรียงจากจุดวัด $P_{0\text{ cm}} > P_{+30\text{ cm}} > P_{+60\text{ cm}}$. สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของจุดวัด $P_{0\text{ cm}}$ และ $P_{+30\text{ cm}}$ ซึ่งอยู่ใกล้สายตัวนำมีความราบเรียบเป็นเส้นตรงมากกว่าจุดวัด $P_{+60\text{ cm}}$.

(ก) จุดวัด P_{0cm} (ข) จุดวัด P_{+30cm} (ค) จุดวัด P_{+60cm}

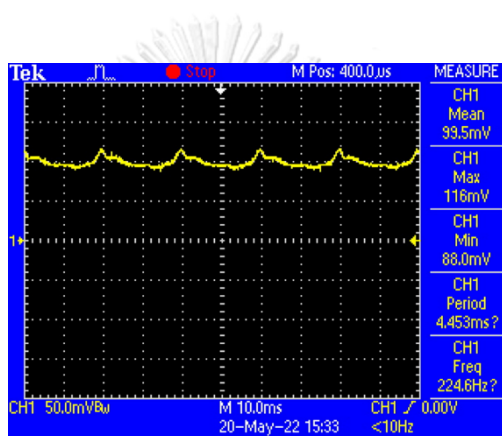
รูปที่ 5.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้จากเครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป กรณีไม่มีสายชิลด์

กรณีที่มิมีสายชิลด์ติดตั้งแสดงในรูปที่ 5.3 ถึง 5.5. ขนาดแรงดันไฟฟ้าของจุดวัด P_{0cm} มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนสายชิลด์. ความราบเรียบของเส้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าลดลงตามจำนวนสายชิลด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกรณีมีสายชิลด์ 3 เส้น.

รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด P_{0cm} กรณีมีสายชิลด์ 1 เส้น



รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด P_{0cm} กรณีมีสายซิลด์ 2 เส้น

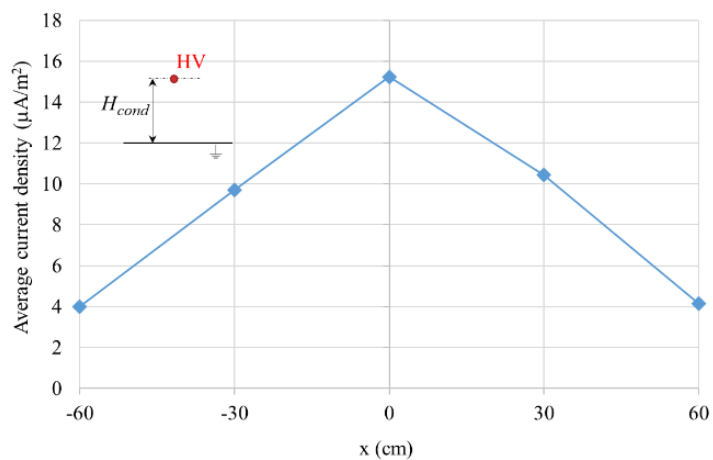


รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้ของจุดวัด P_{0cm} กรณีมีสายซิลด์ 3 เส้น

ผู้วิจัยวัดความหนาแน่นกระแสไอออนทุกรูปแบบการจัดเรียงสายตัวนำและสายซิลด์ โดยทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนของแต่ละจุดวัด. เมื่อพิจารณาข้อมูลของตารางในภาคผนวก ค1 ถึง ค4 พบว่า ผลการวัดในครั้งที่ 1 มีค่าสูงกว่าครั้งที่ 2 เนื่องจากผู้วิจัยทดสอบอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดประจุตกค้างในอากาศและสะสมจนมีความหนาแน่นสูง. การวัดครั้งที่ 2 ผู้วิจัยจึงใช้พัดลมเป่าระบายประจุตกค้างในอากาศประมาณ 5 นาที ในขั้นตอน 4) เพิ่มเติมและทำทุกครั้งก่อนย้ายไปวัดค่าที่จุดวัดใหม่. กราฟค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนจากการวัดทั้งสองครั้งและผลการวัดความหนาแน่นกระแสไอออนมีดังนี้

5.1.1 กรณีไม่มีสายซิลด์

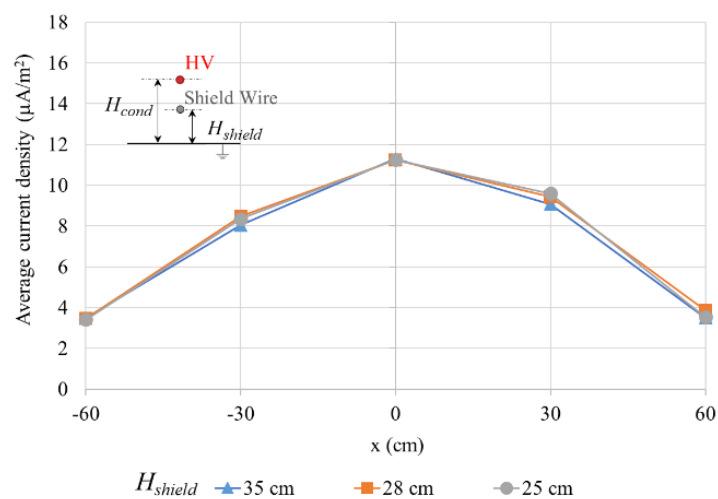
รูปที่ 5.6 แสดงค่าสูงสุดของ $J_{avg} \cong 15.2 \mu A/m^2$ อยู่ใต้สายตัวนำ ($x = 0$ cm). ที่ระยะ $x = 30$ และ 60 cm J_{avg} มีค่าลดลงเป็นแนวโน้มเส้นตรง และลดลงด้วยความชันประมาณ $0.2 \mu A/m^2$ ต่อระยะ $x = 1$ cm.



รูปที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีไม่มีสายชีลด์

5.1.2 กรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น

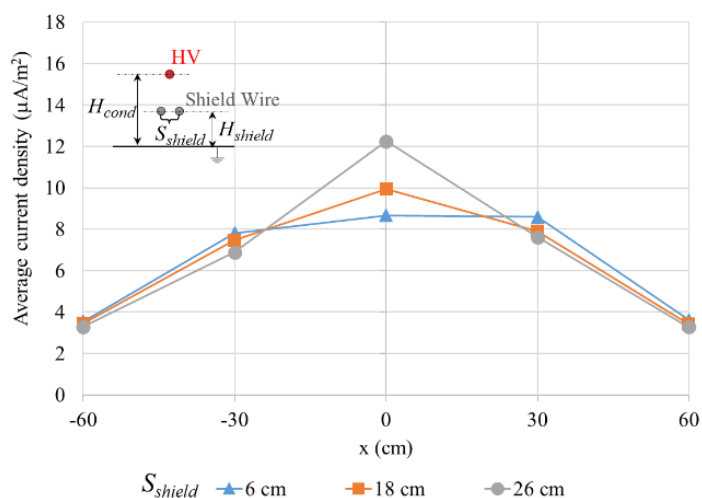
รูปที่ 5.7 แสดงค่าสูงสุดของ $J_{avg} \cong 11.3 \mu A/m^2$ อยู่ใต้สายตัวนำ และลดลง 26% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีสายชีลด์. ที่ระยะ $x = 30$ และ 60 cm ค่าของ J_{avg} ลดลงจากกรณีที่ไม่มีสายชีลด์ประมาณ 1 และ $0.5 \mu A/m^2$ ตามลำดับ. ความสูง H_{shield} ของสายชีลด์ทั้งสามระดับ มีผลการวัด J_{avg} ที่ระดับพื้นดินใกล้เคียงกัน.



รูปที่ 5.7 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น

5.1.3 กรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น

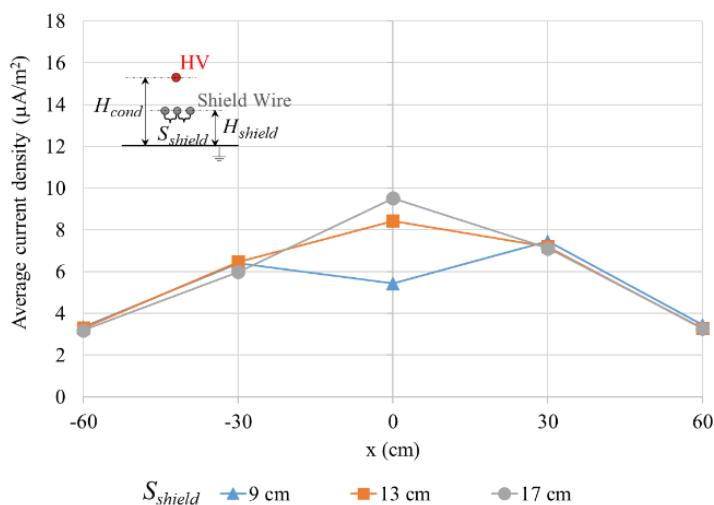
ที่ระยะห่างของสายชีลด์ $S_{shield} = 6$ cm ค่าของ $J_{avg} \cong 8.7 \mu A/m^2$ ดังแสดงในรูปที่ 5.8. เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีสายชีลด์ J_{avg} ได้สายตัวนำลดลง 43%. การเพิ่มระยะห่าง S_{shield} ค่าของ J_{avg} ได้สายตัวนำสูงขึ้น แต่ค่าของ J_{avg} คงเดิมที่ $x = 30$ และ 60 cm. ที่ระยะ $x = 30$ cm ค่าของ J_{avg} ลดลงจากกรณีไม่มีสายชีลด์ประมาณ $2 \mu A/m^2$. ที่ระยะ $x = 60$ cm กรณีที่มีสายชีลด์ 1 และ 2 เส้น J_{avg} มีค่าใกล้เคียงกัน.



รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น

5.1.4 กรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น

ที่ระยะห่างของสายชีลด์ $S_{shield} = 9$ cm ค่าของ $J_{avg} \cong 5.4 \mu A/m^2$ ดังแสดงในรูปที่ 5.9. เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีสายชีลด์ J_{avg} ได้สายตัวนำลดลง 64%. การเพิ่มระยะห่าง S_{shield} ค่าของ J_{avg} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น. ที่ระยะห่าง $x = 30$ cm ค่าของ J_{avg} ลดลงจากกรณีไม่มีสายชีลด์ประมาณ $3 \mu A/m^2$. กรณีมีสายชีลด์ 1, 2 และ 3 เส้น J_{avg} มีค่าใกล้เคียงกันที่ $x = 60$ cm.



รูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนกรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น

จากผลการวัดทั้งหมดสรุปได้ว่า การติดตั้งสายชีลด์สามารถลดค่าความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินได้. การเพิ่มจำนวนสายชีลด์ทำให้ J_{avg} ได้สายตัวนำลดลงได้. ความสูงของสายชีลด์มีผลเล็กน้อยต่อค่า J_{avg} ในการทดสอบครั้งนี้. ระยะห่างของสายชีลด์มีผลทำให้ค่าของ J_{avg} เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนได้สายตัวนำและบริเวณใกล้เคียง. การเลือกจำนวนสายชีลด์และระยะห่างที่เหมาะสมสามารถลด J_{avg} ได้สายตัวนำได้มากกว่า 50%.

5.2 ผลการวัดอุณหภูมิของสายตัวนำและอภิปรายผล

สภาพแวดล้อมของห้องทดสอบเป็นแบบปิด ไม่มีลมพัด มีอุณหภูมิอากาศประมาณ 27–33 °C. สายตัวนำมีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากับอุณหภูมิอากาศ. สายตัวนำที่ลัดวงจรอยู่มีกระแสไฟฟ้าพื้นหลังค่าต่ำประมาณ 35–60 mA ขณะไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า. ผลการวัดอุณหภูมิแต่ละกรณีมีดังนี้

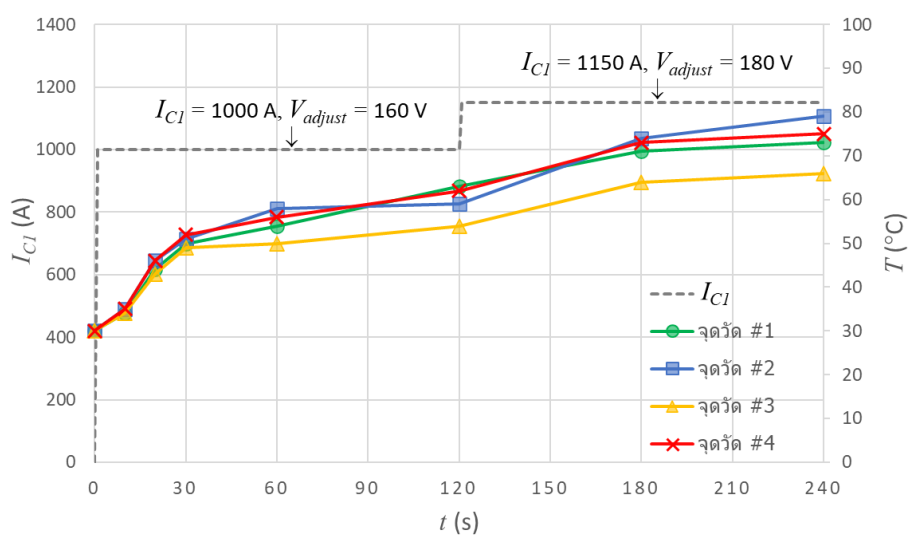
5.2.1 กรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น

แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน $V_{adjust} = 160$ V ได้กระแสไฟฟ้าที่สายตัวนำ $I_{CI} = 1000$ A. รูปที่ 5.10 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของวงสายตัวนำ. ผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดในช่วงเวลา 240 นาที เป็นไปตามรูปที่ 5.11. รายละเอียดผลการวัดอุณหภูมิอยู่ในภาคผนวก ค5. อุณหภูมิของสายตัวนำเพิ่มขึ้นตามเวลาในช่วง 30 นาทีแรก และเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องอีก 90 นาที. อุณหภูมิของแต่ละจุดวัดมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นจุดวัด#3 มีค่าต่ำกว่าจุดวัดอื่นๆ. อุณหภูมิเฉลี่ยในนาที่ที่ 120 ของสายตัวนำประมาณ 60°C .

ในนาที่ที่ 120 แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงถูกปรับเพิ่มค่าแรงดัน $V_{adjust} = 180$ V จึงได้กระแสไฟฟ้าที่สายตัวนำ $I_{CI} = 1150$ A. อุณหภูมิของแต่ละจุดวัดในนาที่ที่ 180 เพิ่มขึ้น 10–15 °C เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในนาที่ที่ 120. อุณหภูมิเฉลี่ยในนาที่ที่ 240 ของสายตัวนำ ประมาณ 73 °C.



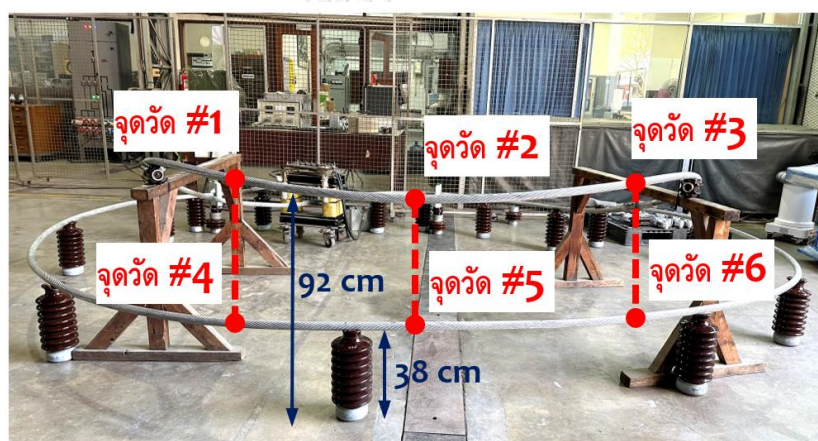
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 1 เส้น



รูปที่ 5.11 ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น
(อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 29.9 °C)

5.2.2 กรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น ที่ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง

แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน $V_{adjust} = 180$ V ได้กระแสไฟฟ้าที่สายตัวนำด้านบน $I_{CI} = 1165$ A และสายตัวนำด้านล่าง $I_{GI} = 0.2$ A. รูปที่ 5.12 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ 3 จุดวัดของสายตัวนำด้านบนและสายตัวนำด้านล่างต่อลงกราวด์. ผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที เป็นไปตามตารางที่ 5.1. อุณหภูมิเฉลี่ยของสายตัวนำด้านบนและด้านล่างประมาณ 66°C และ 29°C ตามลำดับ. ความสูงของสายตัวนำไฟฟ้าแรงสูงจากเดิม 38 cm เปลี่ยนเป็น 92 cm (สูงเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า) ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของสายตัวนำลดลง 6°C .



รูปที่ 5.12 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 1 เส้น ที่ติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น

โดยติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่าง (อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 27.2°C)

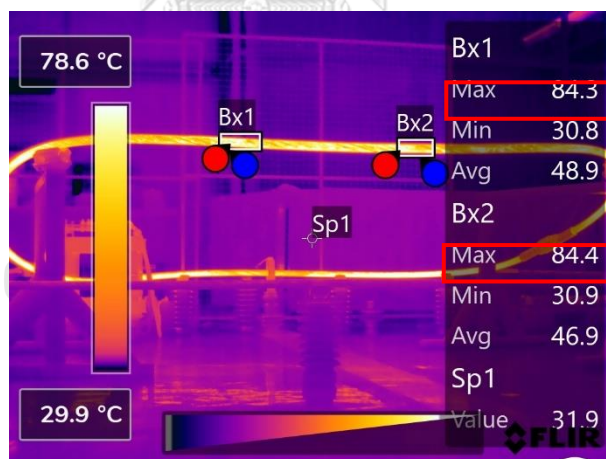
เวลา (นาที)	V_{adjust} (V)	I_{CI} (A)	I_{GI} (A)	อุณหภูมิสายตัวนำที่แต่ละจุดวัด ($^{\circ}\text{C}$)					
				1	2	3	4	5	6
0	0	0.04	0.06	28	28	28	28	28	28
60	180	1165	0.2	66	68	65	29	29	29

ในเวลาต่อมา ผู้วิจัยปิดเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า และปลดสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่างออก. สายตัวนำด้านบนจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่าเดิม $I_{CI} = 1165$ A ใช้เวลานาน 60 นาที. ผลการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเปรียบเทียบระหว่างการมีและไม่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่างแสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ. อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นที่สายตัวนำและอากาศรอบสายตัวนำเป็นชั้นบางๆ เท่านั้น. ตัวแปร Bx1 และ Bx2 ในรูปที่ 5.13(ข) และ 5.14(ข) คือ

พื้นที่สี่เหลี่ยมแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของสายตัวนำด้านบน 2 จุด. ในนาทิตี่ 60 อุณหภูมิสูงสุดของสายตัวนำด้านบนวัดค่าได้ 84.4 และ 82.7 °C เมื่อมีและไม่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่างตามลำดับ. ผลของการติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์ด้านล่างทำให้อุณหภูมิของสายตัวนำด้านบนสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1.7 °C. การใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิวสายตัวนำ. อุณหภูมิเฉลี่ยในนาทิตี่ 60 ซึ่งวัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจากกล้องถ่ายภาพความร้อนประมาณ 18 °C.



(ก) ภาพการติดตั้งอุปกรณ์

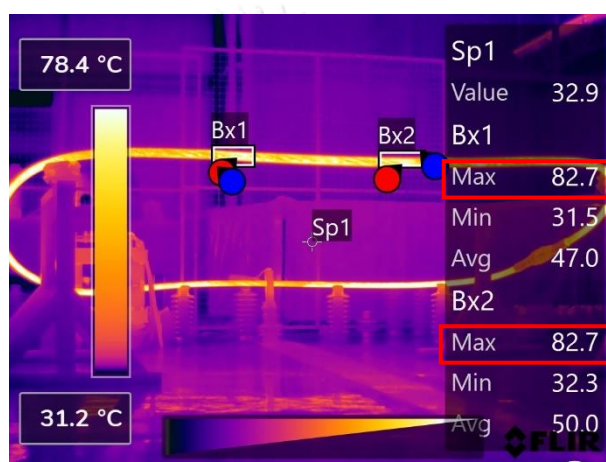


(ข) ภาพการกล้องถ่ายภาพความร้อน

รูปที่ 5.13 ผลการวัดอุณหภูมิกรณีที่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ติดตั้งอยู่ด้านล่าง



(ก) ภาพการติดตั้งอุปกรณ์

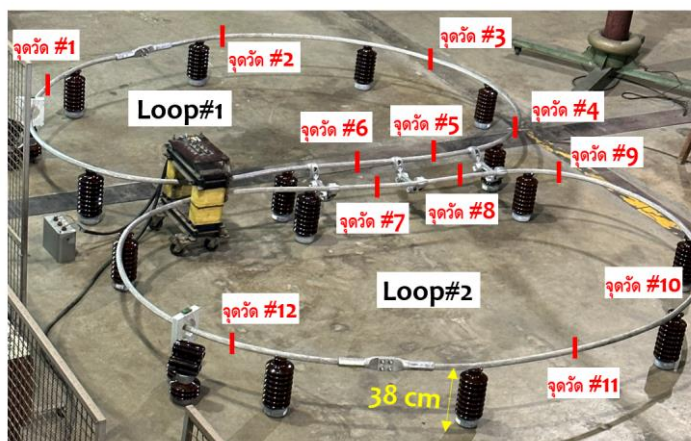


(ข) ภาพการกล้องถ่ายภาพความร้อน

รูปที่ 5.14 ผลการวัดอุณหภูมิกรณีที่ไม่มีสายตัวนำต่อลงกราวด์ติดตั้งอยู่ด้านล่าง

5.2.3 กรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 2 เส้น

แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน $V_{adjust} = 190$ V ได้กระแสไฟฟ้าที่สายตัวนำวงที่ 1 $I_{C1} = 1145$ A และสายตัวนำวงที่ 2 $I_{C2} = 1160$ A. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 12 จุดวัดของสายตัวนำทั้งสองวงแสดงดังรูปที่ 5.15. ผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดในช่วงเวลา 60 นาที เป็นไปตามตารางที่ 5.2. อุณหภูมิสายตัวนำมีแนวโน้มการเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และเพิ่มอย่างช้าในช่วง 30 นาทีหลัง. ในนาที่ที่ 60 อุณหภูมิเฉลี่ยของสายตัวนำบริเวณเส้นเดียวเท่ากับ 63 °C สำหรับสายตัวนำวงที่ 1 (จุดวัด 1-4) และ 71 °C สำหรับสายตัวนำวงที่ 2 (จุดวัด 9-12). อุณหภูมิเฉลี่ยของสายตัวนำบริเวณเส้นคู่เท่ากับ 56 °C สำหรับสายตัวนำวงที่ 1 (จุดวัด 5-6) และ 57 °C สำหรับสายตัวนำวงที่ 2 (จุดวัด 7-8). บริเวณสายตัวนำเส้นคู่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณเส้นเดี่ยวประมาณ $7-14$ °C.

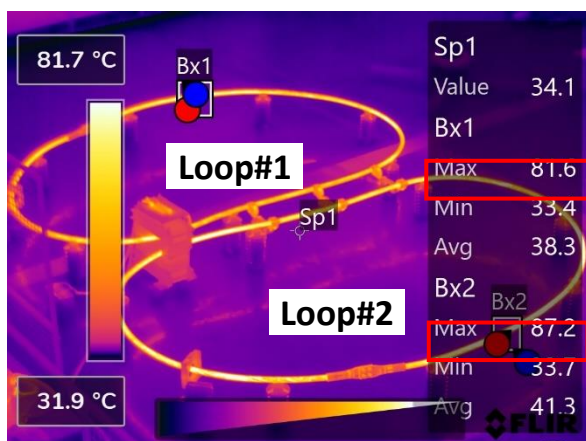


รูปที่ 5.15 ตำแหน่งจุดวัดกรณีสายตัวนำจำนวน 2 เส้น

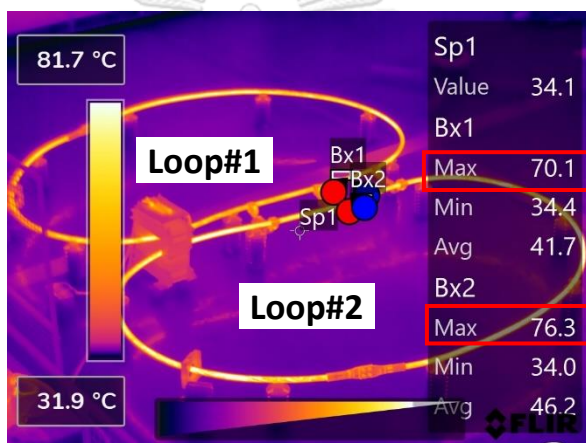
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 2 เส้น
(อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 29.4 °C)

เวลา (นาท)	V_{adjust} (V)	I_{C1} (A)	I_{C2} (A)	อุณหภูมิสายตัวนำที่แต่ละจุดวัด (°C)											
				Loop#1						Loop#2					
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0.03	0.06	29	29	30	29	29	29	29	29	29	29	29	29
15	180	1145	1160	46	53	43	48	38	41	37	42	55	58	58	59
30				56	56	50	55	40	41	41	42	63	66	68	63
45				61	61	53	60	59	53	52	61	64	69	73	69
60				65	69	55	63	59	53	52	61	66	73	75	71

รูปที่ 5.16 แสดงผลการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนาทที่ 60. ตัวแปร Bx1 และ Bx2 ของรูปที่ 5.16(ก) คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมของจุดวัด 2 และ 11 บริเวณสายตัวนำเส้นเดียว. อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 81.6 และ 87.2 °C มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดวัด 2 และ 11 ของตารางที่ 5.2 ประมาณ 12–13 °C. ตัวแปร Bx1 และ Bx2 ของรูปที่ 5.16(ข) คือพื้นที่สี่เหลี่ยมของจุดวัด 5 และ 8 บริเวณสายตัวนำเส้นคู่. อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 70.1 และ 76.3 °C มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดวัด 5 และ 8 ของตารางที่ 5.2 ประมาณ 11–15 °C. แนวโน้มค่าอุณหภูมิสายตัวนำบริเวณเส้นคู่ต่ำกว่าบริเวณเส้นเดี่ยวเช่นเดียวกันกับผลในตารางที่ 5.2.



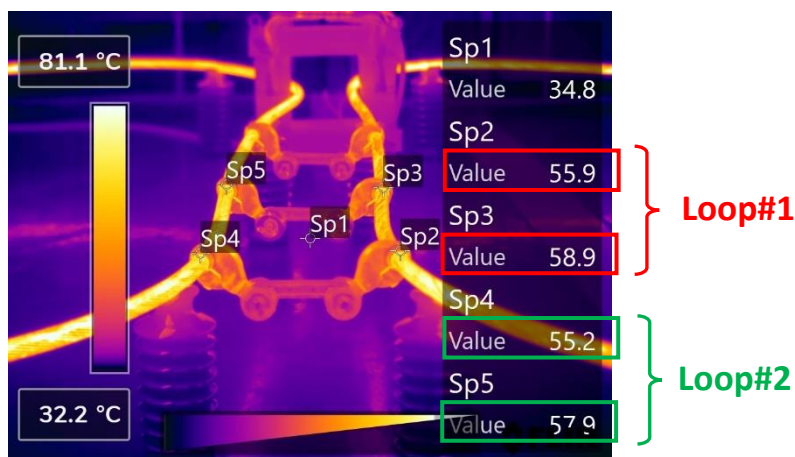
ก) บริเวณสายตัวนำเส้นเดี่ยว



ข) บริเวณสายตัวนำเส้นคู่

รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิกรณีสายตัวนำ 2 เส้น

รูปที่ 5.17 แสดงผลการวัดอุณหภูมิบริเวณสายตัวนำเส้นคู่และอุปกรณ์คั่นสาย. ตัวแปร Sp2 – Sp5 คือ อุณหภูมิวัดได้ที่แคลมป์จับยึดสายตัวนำทั้งสองวงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57 °C. การติดตั้งอุปกรณ์คั่นสายตัวนำทำให้ความร้อนกระจายไปที่แคลมป์จับยึดสาย จึงช่วยลดอุณหภูมิของสายตัวนำในบริเวณเส้นคู่ได้.



รูปที่ 5.17 อุณหภูมิที่บริเวณอุปกรณ์คั่นสายตัวนำ

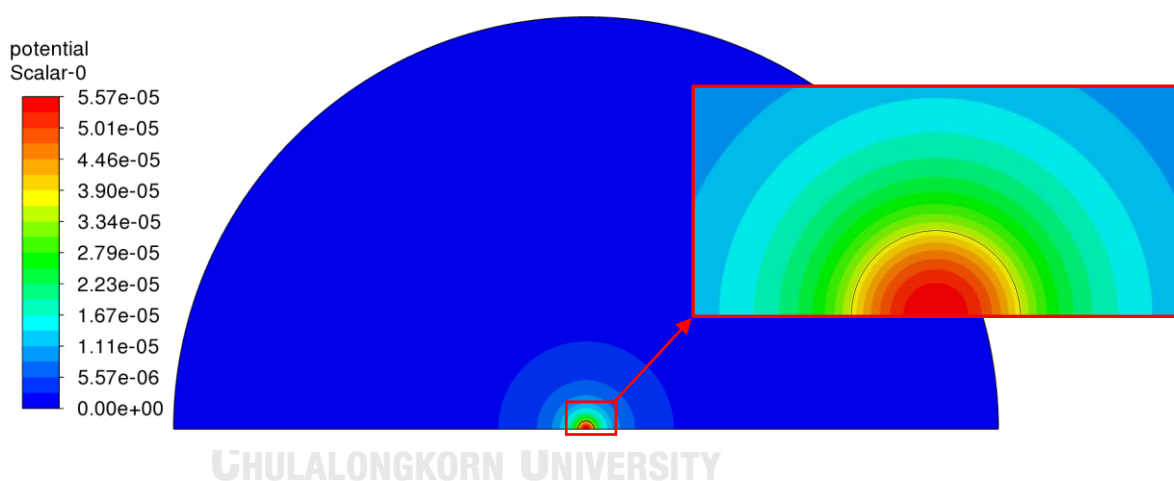
จากผลการวัดอุณหภูมิทั้งหมดสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ทำให้อุณหภูมิของสายตัวนำ 1272 MCM เท่ากับ 75 °C มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1150 A. กระแสไฟฟ้าที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกับผลคำนวณจากมาตรฐาน IEEE738 (1037 A ที่ความเร็วลม 0.6 m/s กระแสไฟฟ้าจากตารางที่ 3.5) และค่าตามมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (1125 A ที่ความเร็วลม 0.6 m/s). อุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงอยู่ที่บริเวณผิวของสายตัวนำเท่านั้น. การติดตั้งสายตัวนำต่อลงกราวด์อยู่ด้านล่างมีผลให้สายตัวนำที่อยู่ด้านบนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย. การเพิ่มความสูงของสายตัวนำจากพื้นดิน ช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของสายตัวนำได้. สายตัวนำ 2 เส้นที่มีอุปกรณ์คั่นสายตัวนำติดตั้งอยู่ จะมีอุณหภูมิที่สายตัวนำและผิวสายตัวนำต่ำกว่าสายตัวนำ 1 เส้น.

บทที่ 6

ผลการจำลองและอภิปรายผล

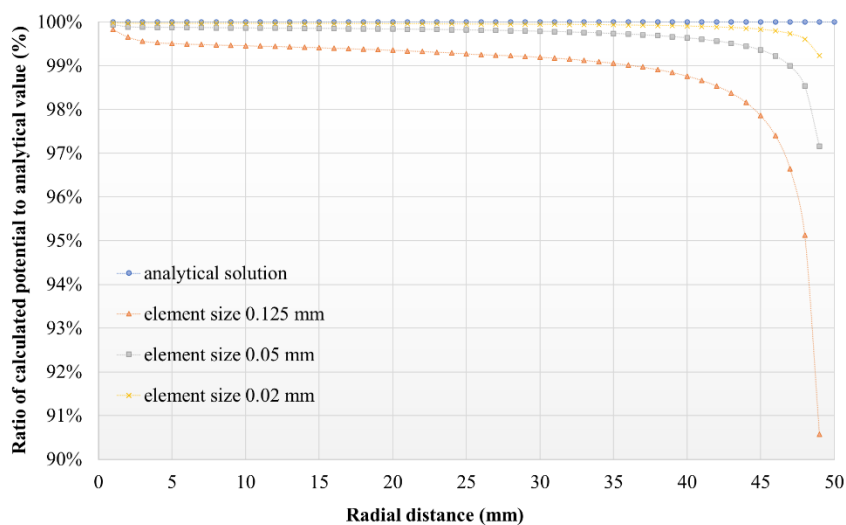
6.1 ผลการจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าของสมการปัวซอง

การจำลองกำหนดความหนาแน่นประจุไฟฟ้า $\rho_v = 1 \text{ nC/m}^3$ ที่ปริมาตรด้านในทรงกลมของแบบจำลองรูปที่ 3.1(ค). รูปที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณเป็นการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้าจากประจุทรงกลมด้านในไปยังทรงกลมอากาศด้านนอกในแบบจำลอง 2 มิติ. ขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้คำนวณเท่ากับ 0.02 mm. ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงภายในประจุทรงกลมและบริเวณใกล้ๆ ผิวของประจุทรงกลมเท่านั้น. ผลการจำลองของศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม ANSYS FLUENT นำมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าในสมการที่ (2.9) ด้วยโปรแกรม MATLAB.



รูปที่ 6.1 ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าที่เป็นคำตอบของสมการปัวซอง

รูปที่ 6.2 แสดงอัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้าจากการจำลองต่อค่าผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ระยะรัศมี 1 ถึง 50mm. รายละเอียดคำตอบศักย์ไฟฟ้าของขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 0.125, 0.05 และ 0.02 mm แสดงในตารางภาคผนวก ง1.1 และ ง1.2. ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้มีค่าน้อยกว่าผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ไม่เกิน 9.5%. คำตอบศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งผิวของประจุทรงกลมด้านในมีค่าแม่นยำมากกว่าที่ตำแหน่งขอบเขตอากาศทรงกลมด้านนอก. การลดขนาดของเอลิเมนต์ทำให้คำตอบศักย์ไฟฟ้ามีค่าแม่นยำมากขึ้น. เมื่อใช้เอลิเมนต์ขนาด 0.02 mm ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.8%.

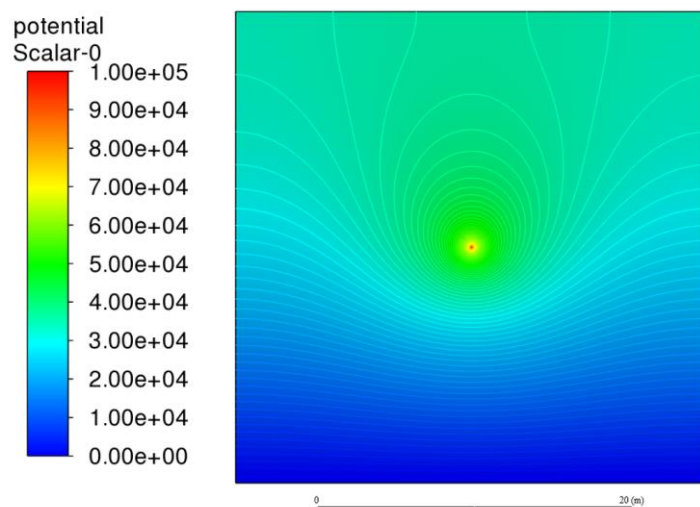


รูปที่ 6.2 ศักย์ไฟฟ้าจากการจำลองเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

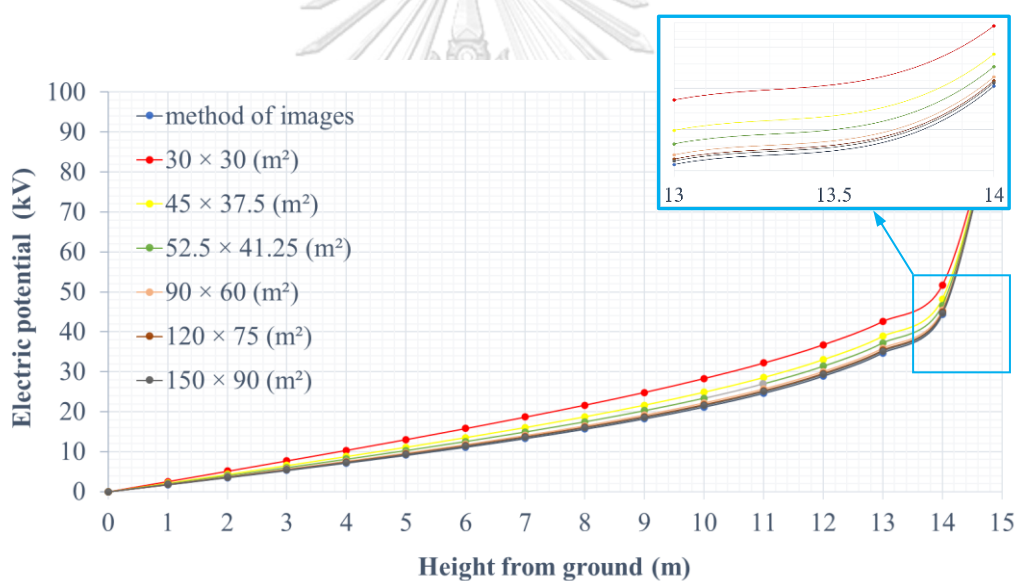
6.2 ผลการจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของสายตัวนำเหนือพื้นดิน

รูปที่ 6.3(ก) แสดงผลการกระจายค่าศักย์ไฟฟ้าของสายตัวนำสูงจากพื้นดิน 15 เมตร ในขอบเขตอากาศของแบบจำลองรูปที่ 3.2. ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 100 kV ที่ผิวสายตัวนำและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะห่างจากสายตัวนำ. รูปที่ 6.3(ข) แสดงคำตอบศักย์ไฟฟ้าตามระดับความสูงในแนวตั้งฉากจากพื้นดินถึงผิวสายตัวนำ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยแม่นยำตรงวิธีเงาประจุตามสมการที่ (2.18). ขนาดขอบเขตอากาศระบุเป็นความกว้าง $W \times$ ความสูง H ตามตารางที่ 3.1. รายละเอียดของค่าศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้แสดงในตารางภาคผนวก ง2.1.

เมื่อใช้ขอบเขตอากาศขนาด 30×30 (m²) ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้มีค่าสูงกว่าผลเฉลยแม่นยำตรงประมาณ 17% ที่ตำแหน่งใกล้ผิวสายตัวนำและ 46% ที่ตำแหน่งใกล้พื้นดิน. การเพิ่มขนาดขอบเขตอากาศทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมากขึ้น. ผลการจำลองของศักย์ไฟฟ้าที่ความสูง $H \geq 60$ m (≈ 4 เท่าของความสูงสายตัวนำ) เริ่มมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากขึ้น ดังเส้นกราฟที่ระยะความสูง 13 ถึง 14 m ของรูปที่ 6.3(ข). ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าที่ความสูง $H \geq 60$ m มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1-2 % ที่ตำแหน่งใกล้ผิวสายตัวนำ และ 2-6 % ที่ตำแหน่งใกล้พื้นดิน.



(ก) การกระจายศักย์ไฟฟ้าของขนาดขอบเขตอากาศ $30 \times 30 \text{ (m}^2\text{)}$



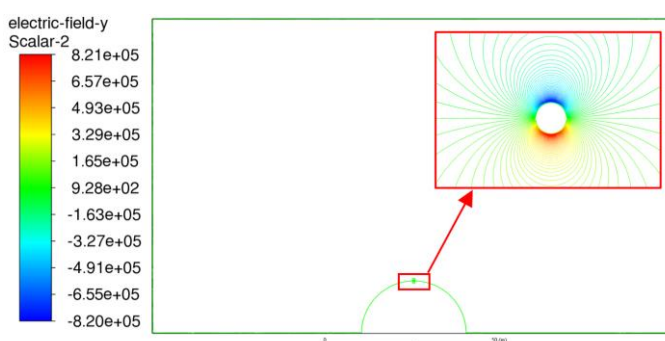
(ข) เปรียบเทียบคำตอบศักย์ไฟฟ้าจากการจำลองและผลเฉลยแม่นยำตรงด้วยวิธีเงาประจุ

รูปที่ 6.3 ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน

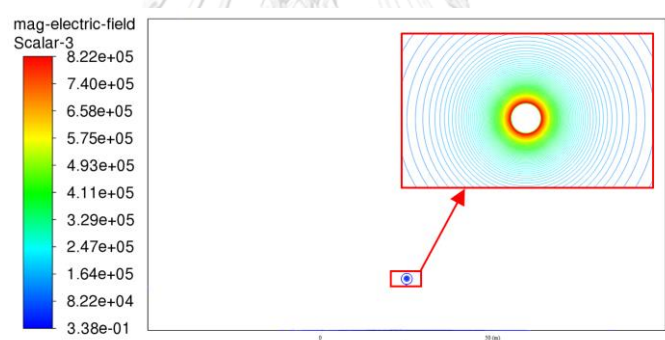
เมื่อพิจารณาเฉพาะแบบจำลองที่มีขนาดขอบเขตอากาศกว้างที่สุด $150 \times 90 \text{ (m}^2\text{)}$ ในรูปที่ 6.4(ก) ถึง 6.4(ค) สนามไฟฟ้าที่จำลองได้มีค่าสูงที่ผิวตัวนำทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y . สนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวอยู่ที่ผิวสายตัวนำและบริเวณพื้นดินบางส่วนใต้สายตัวนำเท่านั้น.



(ก) สนามไฟฟ้าในแนวแกน x



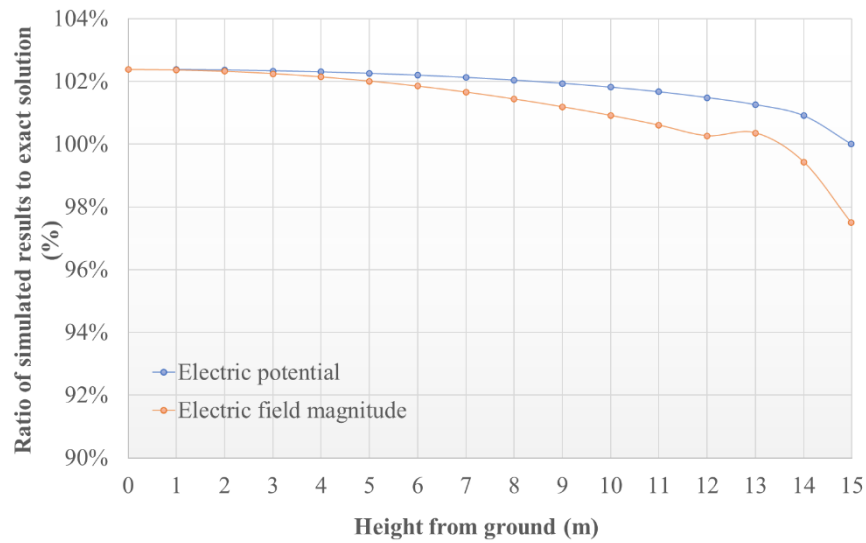
(ข) สนามไฟฟ้าในแนวแกน y



(ค) การกระจายขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ 6.4 สนามไฟฟ้าที่คำนวณได้เมื่อใช้แบบจำลองขนาดขอบเขตอากาศ $150 \times 90 \text{ (m}^2\text{)}$

รูปที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบขนาดศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของผลการจำลองต่อกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเงาประจุ. ผลการจำลองขนาดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งผิวสายตัวนำมีค่าต่ำกว่าคำตอบประมาณ 2.5%. ที่ความสูงจากระดับพื้นดินช่วงระหว่าง 0 ถึง 13 m ขนาดสนามไฟฟ้าที่จำลองได้เริ่มมีค่าสูงกว่าคำตอบจากวิธีเงาประจุและสูงกว่าผลคำนวณประมาณ 2.4 % ที่ระดับพื้นดิน. รายละเอียดคำตอบของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าแสดงในตารางภาคผนวก ง 2.2.



รูปที่ 6.5 ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าการจำลองต่อค่าจากวิธีเงาประจุ
เมื่อแบบจำลองมีขนาดขอบเขตอากาศเท่ากับ $150 \times 90 \text{ (m}^2\text{)}$

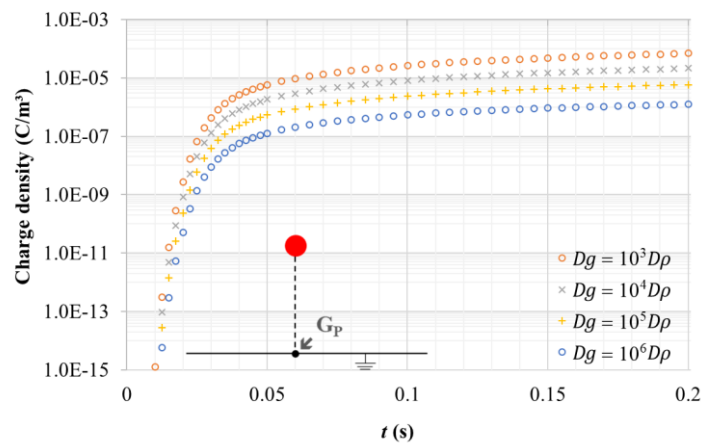
6.3 ผลการจำลองสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียว

6.3.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยที่มีอยู่ [23]

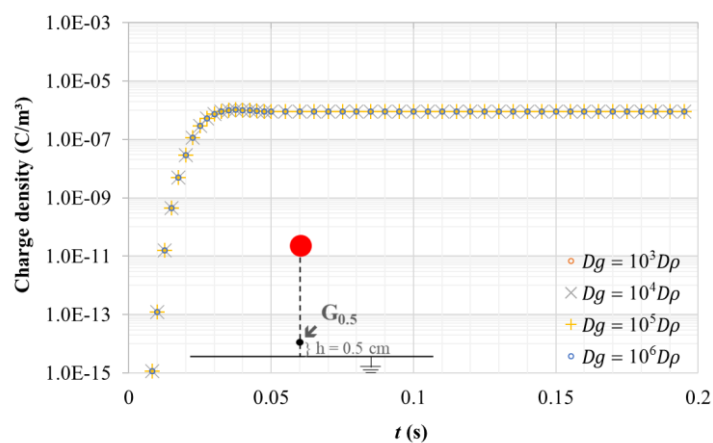
การจำลองกำหนดตัวแปรตามงานวิจัยที่มีอยู่ [23] โดยใช้สภาพความเรียบของผิวสายตัวนำ $m = 0.9$, ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ $\delta = 1$, ค่าคงที่สายตัวนำชั่วคราว $E_0 = 33.7 \text{ kV/cm}$, $K = 33.7 \text{ cm}^{1/2}$. ผลคำนวณตามสมการที่ (2.2) มีค่าสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา $E_C = 54.6 \text{ kV/cm}$. ค่าความเคลื่อนที่ได้ของไอออน $\mu = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V.s}$ และสัมประสิทธิ์การแพร่ $D_p = 3.88 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ใช้แทนค่าในสมการอนุกรมประจุไฟฟ้าที่ (3.6). รูปแบบการจัดเรียงสายส่ง 70 kV HVDC กรณีไม่มีสายชีลด์ในรูปที่ 3.3(ก) และแบบจำลองในรูปที่ 3.4 คำนวณโดยปรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่บริเวณพื้นดิน $D_g = 10^3 D_p - 10^6 D_p$. เมื่อเลือกใช้ขนาดขั้นเวลาในการจำลองเท่ากับ 0.05 ms ผลการจำลองตามเวลาของความหนาแน่นไอออนที่ใต้สายตัวนำจุด G_p ณ ระดับพื้นดิน และ $G_{0.5}$ ณ ความสูง 0.5 cm จากระดับพื้นดินแสดงดังรูปที่ 6.6. รายละเอียดของผลคำนวณแสดงในตารางภาคผนวก ง3.1.

ไอออนเริ่มสะสมที่จุด G_p เมื่อเวลา $t \approx 0.01 \text{ s}$ และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเวลา $t \geq 0.05 \text{ s}$ ดังรูปที่ 6.6(ก). ความแตกต่างของค่า D_g มีผลต่อคำตอบความหนาแน่นไอออนโดยตรง. D_g ค่าสูงสุดทำให้ความหนาแน่นไอออนที่จุด G_p มีค่าต่ำสุด. อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาที่จุด $G_{0.5}$

ความสูง 0.5 cm จากระดับพื้นดิน ค่าของ D_g มีผลต่อค่าของความหนาแน่นไอออนน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.6(ข).



(ก) จุด G_p ที่ความสูงระดับพื้นดิน



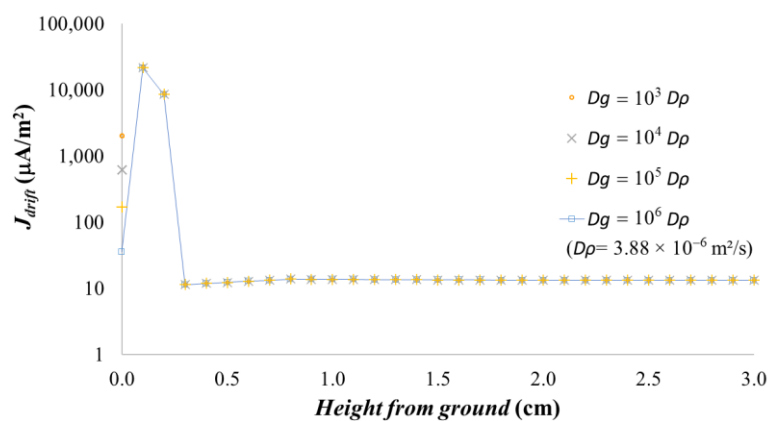
(ข) จุด $G_{0.5}$ ที่ความสูง 0.5 cm จากระดับพื้นดิน

รูปที่ 6.6 ผลการจำลองความหนาแน่นไอออนที่ได้สายตัวนำเป็นฟังก์ชันของเวลา t ในการจำลอง

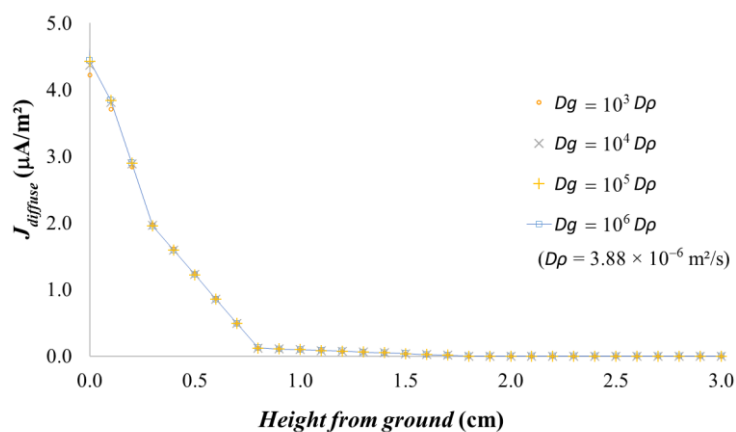
เมื่อพิจารณาทางขวามือของสมการที่ (3.5) พจน์แรกเป็นความหนาแน่นกระแสไอออน J_{drift} จากความเร็วลอยเลื่อนของไอออน และพจน์สองเป็นความหนาแน่นกระแสไอออน $J_{diffuse}$ จากการแพร่ของไอออน. ผลการจำลอง J_{drift} และ $J_{diffuse}$ ที่ความสูงจากใกล้ระดับพื้นดิน 0 ถึง 3 cm แสดงดังรูปที่ 6.7 (รายละเอียดในตารางภาคผนวก ง3.2).

ในรูปที่ 6.7(ก) J_{drift} มีค่าสูงมากที่ช่วงความสูง 0 ถึง 0.2 cm และลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ค่าคงที่ช่วงความสูง 0.2 ถึง 3.0 cm. ที่ความสูง 0 cm J_{drift} ลดลงเมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ D_g ของพื้นดิน. รูปที่ 6.7(ข) $J_{diffuse}$ มีค่าสูงที่ความสูง 0 cm และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมี

ค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น. ที่ความสูง 1.8 cm $J_{diffuse}$ มีค่าต่ำมากจนสามารถละเลยได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกความหนาแน่นกระแสไอออนที่ความสูง 1.8 cm เป็นคำตอบที่ระดับพื้นดินของแบบจำลอง.



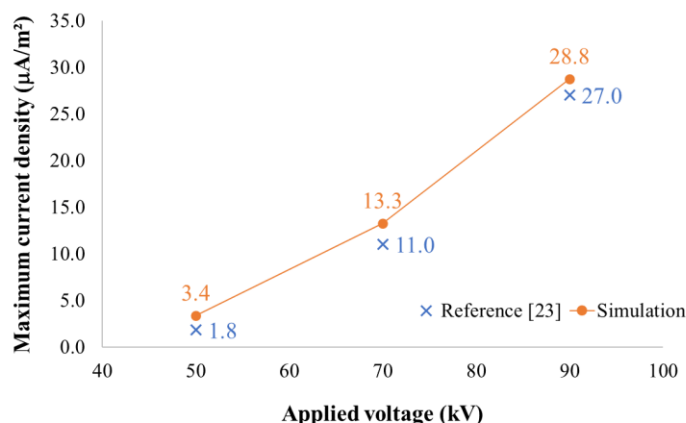
(ก) J_{drift}



(ข) $J_{diffuse}$

รูปที่ 6.7 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนจากความเร็วลอยเลื่อนและการแพร่ ที่ความสูงใกล้ระดับพื้นดิน

เมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายตัวนำเท่ากับ 50, 70 และ 90 kV ค่าสูงสุดของกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีอยู่ [23] แสดงดังรูปที่ 6.8. ผลการจำลองที่ความสูง 1.8 cm มีค่าตอบใกล้เคียงกับผลของงานวิจัย โดยมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.5 ถึง 2.2 $\mu A/m^2$.



รูปที่ 6.8 ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีอยู่

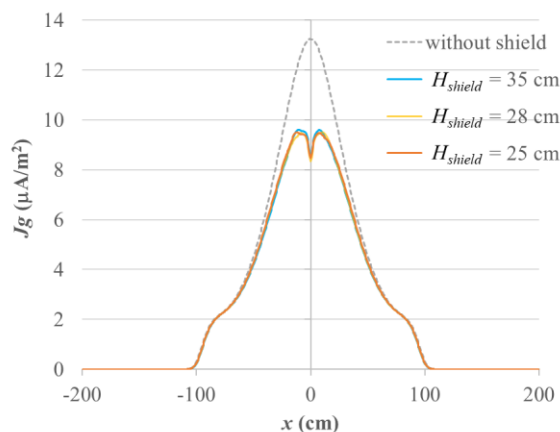
6.3.2 ผลของสายชิลด์ที่มีต่อสนามไฟฟ้าและกระแสไอออน

รูปแบบการจัดเรียงสายส่ง 70 kV HVDC ทั้งกรณีไม่มีและมีสายชิลด์ในรูปที่ 3.3 จำลองด้วยเงื่อนไขเดิมตามหัวข้อ 6.3.1 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่บริเวณพื้นดิน $D_g = 10^6 D_\rho$. รายละเอียดของค่าผลการจำลองทั้งกรณีไม่มีและมีสายชิลด์อยู่ในตารางภาคผนวก ง3.3 และ ง3.4.

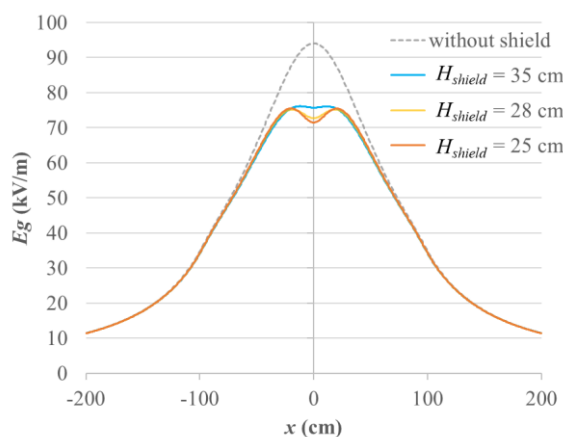
1) กรณีที่มีสายชิลด์ 1 เส้น

การศึกษาแปรค่าความสูงสายชิลด์ $H_{shield} = 25, 28$ และ 35 cm. ขนาดความหนาแน่นกระแสไอออน J_g และขนาดสนามไฟฟ้า E_g ที่จำลองได้ที่ระดับพื้นดินแสดงดังรูปที่ 6.9. กรณีที่ไม่มีสายชิลด์ J_g และ E_g มีค่าสูงสุดอยู่ใต้สายตัวนำ ($x = 0$ cm). เมื่อติดตั้งสายชิลด์ 1 เส้น ดังรูปที่ 6.9(ก) ค่าของ J_g ใต้สายตัวนำลดลง 37% จากเดิม $13.3 \mu A/m^2$ เป็นประมาณ $8.5 \mu A/m^2$ สำหรับทุกความสูง H_{shield} . ค่าสูงสุดของ $J_g \approx 9.5 \mu A/m^2$ เปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่ที่ $x = \pm 10$ cm.

ค่าของ E_g ใต้สายตัวนำลดลง 23% จากเดิม 94 kV/m เป็น 73 kV/m. E_g ในรูปที่ 6.9(ข) มีค่าสูงสุด ≈ 75 kV/m และเปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่ที่ $x = \pm 19$ cm. แนวโน้มของ J_g และ E_g ที่ความสูง $H_{shield} = 25$ และ 28 cm ใกล้เคียงกัน. ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g มีค่าน้อยที่สุดที่ความสูง $H_{shield} = 28$ cm. ดังนั้นความสูงสายชิลด์ 28 cm จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งสายชิลด์ 1 เส้น.



(ก) ความหนาแน่นกระแสไอออน



(ข) สนามไฟฟ้า

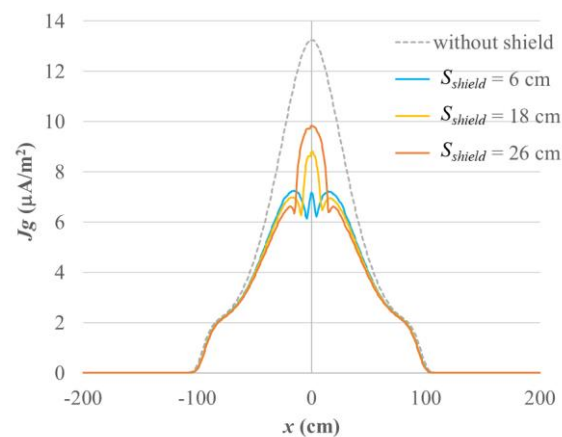
รูปที่ 6.9 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 1 เส้น

2) กรณีที่มีสายชีลด์ 2 เส้น

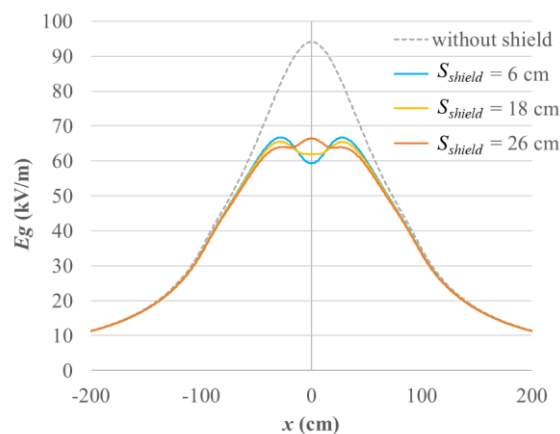
กรณีที่มีสายชีลด์ 2 เส้น กำหนดความสูงสายชีลด์ $H_{shield} = 28$ cm และระยะห่างระหว่างสายชีลด์ $S_{shield} = 6, 18$ และ 26 cm. รูปที่ 6.10 แสดงผลการจำลองพบว่า J_g และ E_g ที่ตำแหน่งใต้สายตัวนำมีแนวโน้มลดลงเฉพาะกรณี $S_{shield} = 6$ cm เท่านั้น. ค่าสูงสุดของ $J_g \approx 7.3 \mu A/m^2$ ในรูปที่ 6.10(ก) อยู่ที่ $x = 0$ และ ± 15 cm ซึ่งลดลง 45% จากกรณีที่ไม่มีสายชีลด์.

สนามไฟฟ้าใต้สายตัวนำ ($x = 0$) กรณี $S_{shield} = 6$ cm เท่ากับ 59 kV/m ลดลง 27% จากกรณีไม่มีสายชีลด์. E_g กรณี $S_{shield} = 6$ cm ในรูปที่ 6.10(ข) มีค่าสูงสุด ≈ 67 kV/m

เปลี่ยนไปอยู่ที่ $x = \pm 28$ cm. การเพิ่มระยะห่าง S_{shield} ส่งผลให้ J_g และ E_g มีค่าสูงขึ้นที่ตำแหน่งใต้สายตัวนำ. ดังนั้นระยะห่าง $S_{shield} = 6$ cm จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งสายชีลด์ 2 เส้น.



(ก) ความหนาแน่นกระแสไอออน



(ข) สนามไฟฟ้า

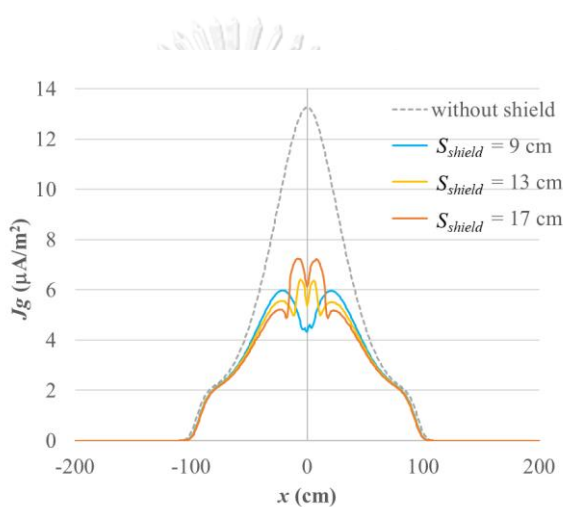
รูปที่ 6.10 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 2 เส้น

3) กรณีที่มีสายชีลด์ 3 เส้น

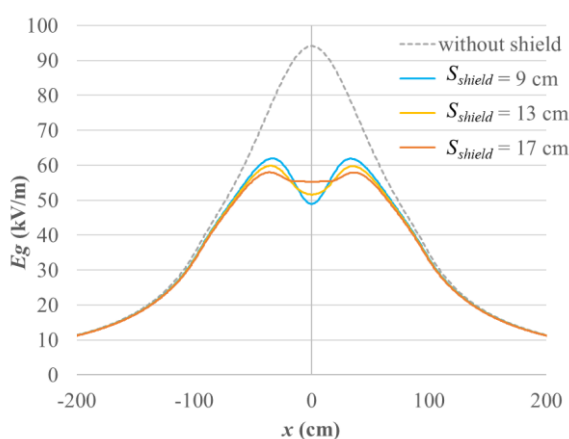
กรณีที่มีสายชีลด์ 3 เส้น กำหนดความสูงสายชีลด์ $H_{shield} = 28$ cm และระยะห่างระหว่างสายชีลด์ $S_{shield} = 9, 13$ และ 17 cm. รูปที่ 6.11 แสดงผลการจำลองพบว่า J_g และ E_g

ที่ตำแหน่งใต้สายตัวนำ ($x = 0$) มีแนวโน้มลดลงเฉพาะกรณี $S_{shield} = 9$ cm. การเพิ่มระยะห่าง S_{shield} ส่งผลให้ J_g และ E_g มีค่าสูงขึ้นใต้สายตัวนำเช่นเดียวกับกรณีสายชีลด์ 2 เส้น. J_g มีค่า $4.3 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ที่ตำแหน่ง $x = 0$ ลดลง 67% จากกรณีไม่มีสายชีลด์. ค่าสูงสุด $J_g \approx 6.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$ กรณี $S_{shield} = 9$ cm อยู่ที่ $x = \pm 21$ cm ดังรูปที่ 6.11(ก).

เมื่อ $S_{shield} = 9$ cm ขนาดของ E_g ใต้สายตัวนำ ($x = 0$) เท่ากับ 49 kV/m ลดลง 48% จากกรณีไม่มีสายชีลด์. E_g ในรูปที่ 6.11(ข) มีค่าสูงสุด ≈ 62 kV/m เปลี่ยนไปอยู่ที่ตำแหน่ง $x = \pm 33$ cm. ดังนั้น ผู้วิจัยพิจารณาว่า ระยะห่าง $S_{shield} = 9$ cm เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งสายชีลด์ 3 เส้น.



(ก) ความหนาแน่นกระแสไอออน



(ข) สนามไฟฟ้า

รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสนามการไหลของไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีสายชีลด์ 3 เส้น

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการจำลองค่าของ J_g และ E_g ที่ระดับพื้นดินที่ได้จากทุกกรณีของการจำลอง. การติดตั้งสายชีลด์ช่วยลดค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ได้สายตัวนำและบริเวณข้างเคียงในช่วง $x = \pm 80$ cm. จำนวนสายชีลด์ที่เพิ่มขึ้นและระยะติดตั้งที่เหมาะสม (กรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น $S_{shield} = 9$ cm) สามารถลดค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ได้สายตัวนำได้ถึง 50%. การติดตั้งสายชีลด์ยังทำให้ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g มีตำแหน่งเลื่อนออกห่างสายตัวนำ. การเพิ่มจำนวนและระยะห่างของสายชีลด์ส่งผลให้ตำแหน่งของค่าสูงสุดเลื่อนออกห่างจากสายตัวนำมากขึ้น. ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งสายชีลด์ในทุกกรณีมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่มีสายชีลด์.

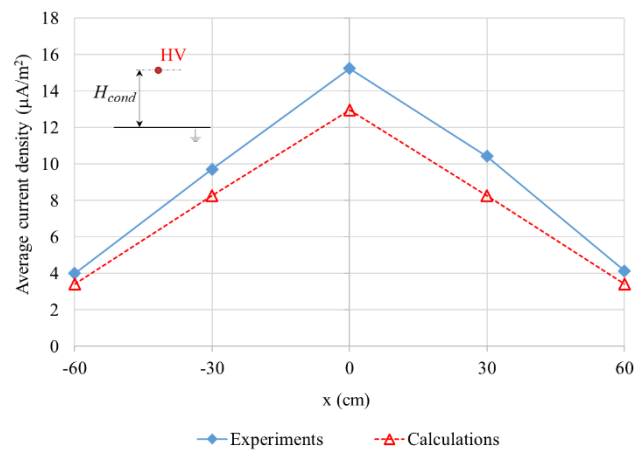
ตารางที่ 6.1 ผลการจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง 70 kV HVDC

จำนวน สายชีลด์	H_{shield} (cm)	S_{shield} (cm)	$J_g (x=0)$ ($\mu A/m^2$)	J_g สูงสุด		$E_g (x=0)$ (kV/m)	E_g สูงสุด	
				ขนาด ($\mu A/m^2$)	ตำแหน่ง x (cm)		ขนาด (kV/m)	ตำแหน่ง x (cm)
0			13.3			94		
1	35		8.5	9.6	± 10	76	76	± 12
1	28		8.5	9.5	± 10	73	75	± 19
1	25		8.5	9.5	± 10	72	75	± 20
2	28	6	7.3	7.3	± 15	59	67	± 28
2	28	18	8.8	7.0	± 16	62	66	± 28
2	28	26	9.8	6.6	± 19	67	64	± 27
3	28	9	4.3	6.0	± 21	49	62	± 33
3	28	13	5.4	6.4	± 6	52	60	± 35
3	28	17	6.1	7.2	± 8	55	58	± 36

6.3.3 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดกระแสไอออนหัวข้อ 5.1

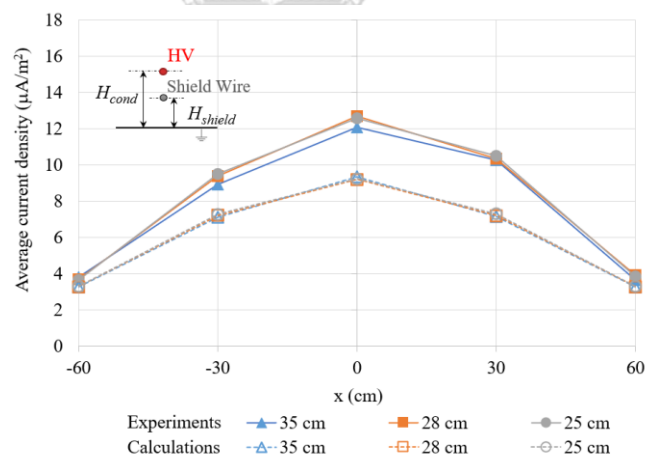
การเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไอออนระหว่างผลการจำลองหัวข้อ 6.3.2 และผลการวัดหัวข้อ 5.1 มีรายละเอียดในตารางภาคผนวก ค. ผลการจำลองของเส้นกราฟ J_g ในรูปที่ 6.9(ก) ถึง 6.11(ก) ถูกแปลงให้เป็นค่าเฉลี่ย J_g ต่อพื้นที่แผ่นวิลสันขนาด 20×20 (cm²) ก่อนนำไปเปรียบเทียบค่าทดสอบในแต่ละจุดวัด.

- 1) กรณีไม่มีสายชีลด์ในรูปที่ 6.12 ผลการวัดกระแสไอออนมีค่าสูงกว่าผลการจำลองและมีแนวโน้มคล้ายกัน. ตำแหน่งที่มีกระแสไอออนสูงสุดอยู่ใต้สายตัวนำมีค่าแตกต่างกัน 18%.



รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีไม่มีสายชีลด์

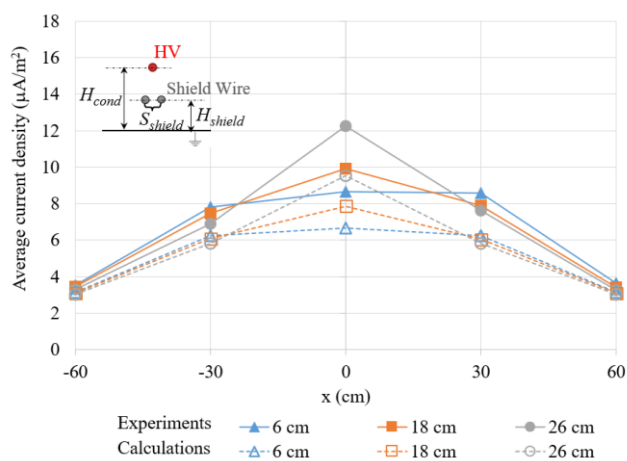
- 2) กรณีมีสายชีลด์ 1 เส้นในรูปที่ 6.13 การปรับเปลี่ยนความสูงของสายชีลด์มีผลต่อค่ากระแสไอออนน้อยมากทั้งผลการวัดและผลการจำลอง. ผลของการติดตั้งสายชีลด์ลดค่ากระแสไอออนได้สายตัวนำได้ชัดเจน. ค่ากระแสไอออนสูงสุดของผลการวัดลดได้ต่ำกว่าผลการจำลอง 10%.



รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น

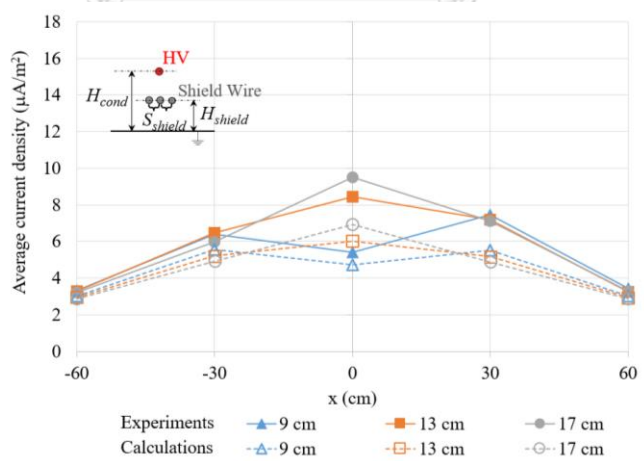
- 3) กรณีมีสายชีลด์ 2 เส้นในรูปที่ 6.14 การปรับระยะห่างของสายชีลด์มีผลต่อการเพิ่ม-ลดของค่ากระแสไอออนในช่วง $x = \pm 30$ cm. ผลการจำลองและผลการวัด

มีแนวโน้มการเพิ่ม-ลดในทิศทางเดียวกัน. กรณี $S_{shield} = 6$ cm กระแสไอออนได้สายตัวของผลการวัดและผลการจำลองลดลงได้ดีที่สุดเหมือนกัน.



รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น

- 4) กรณีมีสายชีลด์ 3 เส้นในรูปที่ 6.15 การปรับระยะห่างของสายชีลด์มีผลต่อค่ากระแสไอออนทั้งผลการวัดและผลการจำลอง. เส้นกราฟมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน. กรณี $S_{shield} = 9$ cm สามารถลดกระแสไอออนได้สายตัวนำและช่วง $x = \pm 30$ cm ได้ดีที่สุดเหมือนกัน.



รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย J_g ระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบกรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น

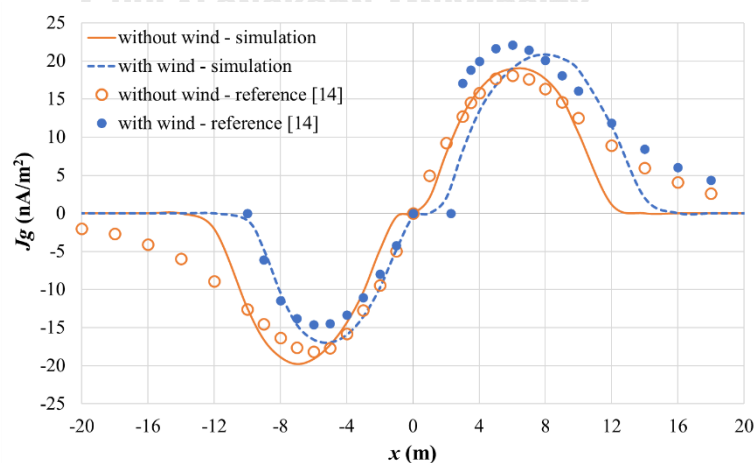
การเปรียบเทียบทั้งหมดสรุปได้ว่า การติดตั้งสายชีลด์ทุกกรณีมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสไอออนของผลการวัดและผลการจำลองเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน. ความหนาแน่นกระแสไอออนที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าผลที่จำลองได้ ทั้งกรณีที่ไม่มีการติดตั้งสายชีลด์. ผลการ

จำลองก็แสดงว่า ระยะห่างสายลัดที่ช่วยลดความหนาแน่นกระแสไอออนได้ดีที่สุดสอดคล้องกับผลการวัดในห้องปฏิบัติการ.

6.4 ผลการจำลองสายส่ง HVDC แบบชั่วคราวเปรียบเทียบกับงานวิจัย [14]

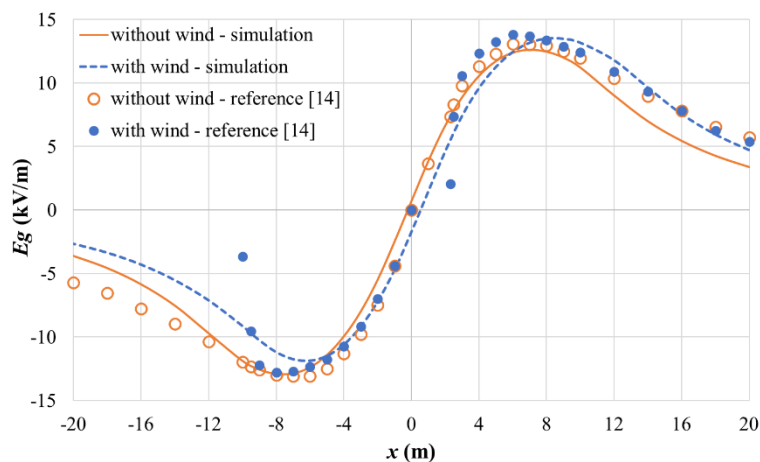
การจำลองกำหนดตัวแปรตามงานวิจัยที่ต้องการเปรียบเทียบผลการจำลอง [14] โดยมีสัมประสิทธิ์สภาพความเรียบของผิวสายตัวนำ $m = 0.7$, ค่าสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา $E_C = 27.3$ kV/cm, ค่าความเคลื่อนที่ได้ของไอออน $\mu_{\pm} = 1.5 \times 10^{-4}$ m²/V.s และสัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{\rho\pm} = 3.88 \times 10^{-6}$ m²/s. แบบจำลองรูปที่ 3.8 ของสายส่งแบบชั่วคราว ± 250 kV จำนวนที่กรณีไม่มีลมและกรณีมีความเร็วลมอ้างอิง $w_r = 0.5$ m/s และสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือน $\alpha = 0.3$. เมื่อใช้ขนาดขั้นเวลาจำลองเท่ากับ 1 ms การลู่เข้าของคำตอบเกิดขึ้นที่เวลาจำลอง 5 s. $J_{diffuse}$ มีค่าต่ำมากจนตัดออกได้ที่ความสูง 0.001 m จึงใช้เป็นคำตอบของผลการจำลองที่ระดับพื้นดิน. รูปที่ 6.16 แสดงผลการจำลองของ J_g และ E_g ของทั้งสองกรณีเปรียบเทียบกับงานวิจัย. รายละเอียดของผลการจำลองทั้งกรณีไม่มีลมและมีลมแสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ง3.5.

ผลการจำลองของ J_g ในรูปที่ 6.16 มีคำตอบใกล้เคียงกับงานวิจัยในช่วงระหว่างสายตัวนำชั่วคราวและชั่วคราว ($x = \pm 10$ m) และมีแนวโน้มแตกต่างกันในช่วง $|x| > 10$ m. กรณีที่ไม่มีลมและกรณีที่มีลม J_g สูงสุดของผลการจำลองเกิดขึ้นที่ $x = \pm 7$ m และ $x = -5, 8$ m ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับงานวิจัย. กรณีที่ไม่มีลม ขนาดของ J_g ทั้งสองข้างสูงกว่างานวิจัยประมาณ 7 %. กรณีที่มีลม ขนาดของ J_g ขั้วลบสูงกว่าประมาณ 16 % และขนาดของ J_g ขั้วบวกต่ำกว่าประมาณ 6 %.



รูปที่ 6.16 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่งแบบชั่วคราว ± 250 kV

ผลการจำลองของ E_g ในรูปที่ 6.17 มีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัย. กรณีที่มีลม ผลการจำลอง E_g ในช่วง $x < -10$ m มีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง แต่งานวิจัยไม่แสดงค่าของ E_g . เส้นกราฟของ E_g กรณีที่มีลม 0.5 m/s เลื่อนไปตามทิศทางของลมประมาณ 1.5 m แต่งานวิจัยยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม. กรณีที่ไม่มีลม ขนาดของ E_g ทั้งสองขั้วต่ำกว่างานวิจัยประมาณ 2 %. กรณีที่มีลม ขนาดของ E_g ขั้วลบต่ำกว่าประมาณ -7 % และขนาดของ E_g ขั้วบวกต่ำกว่าประมาณ 2 %.



รูปที่ 6.17 สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่งแบบขั้วคู่ ± 250 kV

การเปรียบเทียบแสดงว่า ผลการจำลองของ J_g และ E_g ที่ระดับพื้นดิน มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย [14] ทั้งกรณีที่ไม่มีและกรณีที่มีลม. ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ที่จำลองได้ได้สายตัวนำมีการปรับขนาดลดลงทางด้านขั้วลบ เพิ่มขึ้นทางด้านขั้วบวก และมีตำแหน่งเลื่อนไปตามทิศทางของลม. ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ในงานวิจัย อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ทั้งกรณีที่ไม่มีและกรณีที่มีลม.

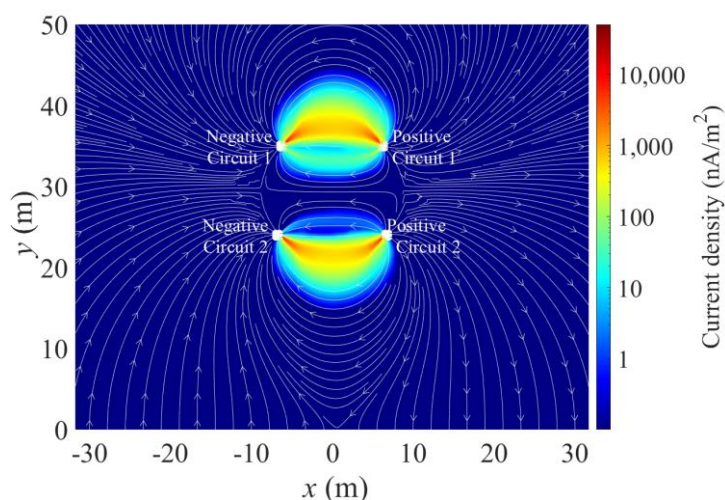
6.5 สายส่ง ± 500 kV HVDC

6.5.1 การวิเคราะห์ผลการใช้สายตัวนำ DMRC

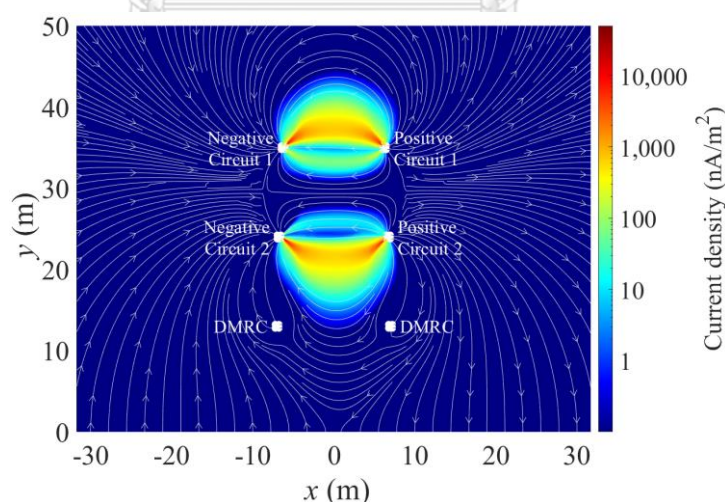
การจำลองสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีไม่มีและมีสายตัวนำ DMRC ตามรูปที่ 3.9 กำหนดสภาพความเรียบของผิวสายตัวนำ $m = 0.7$ และค่าของไอออนขั้วบวกและลบแตกต่างกันดังนี้

- สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา $E_{C+} = 27.9$ kV/cm, $E_{C-} = 26.8$ kV/cm
- ค่าความเคลื่อนที่ได้ของไอออน $\mu_+ = 1.4 \times 10^{-4}$ m²/V.s, $\mu_- = 1.8 \times 10^{-4}$ m²/V.s
- สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{\rho+} = 3.62 \times 10^{-6}$ m²/s, $D_{\rho-} = 4.65 \times 10^{-6}$ m²/s

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขไม่มีลม ผลการจำลองของกระแสไอออนเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีและกรณีที่มีสายตัวนำ DMRC แสดงได้ดังรูปที่ 6.18. กระแสไอออนมีความหนาแน่นสูงไหลอยู่ระหว่างสายตัวนำแรงสูงชั่วบวกและลบ. กระแสไอออนแยกไหลออกเป็นด้านบนของกลุ่มวงจร 1 และด้านล่างของกลุ่มวงจร 2 เหมือนกันทั้งสองกรณี. กรณีที่มีสายตัวนำ DMRC ในรูปที่ 6.18 (ข) กระแสไอออนของกลุ่มวงจร 2 กระจ่ายตัวไหลลงมาที่ช่องว่างของสายตัวนำ DMRC. บริเวณอื่นๆ ตั้งแต่ระดับสายตัวนำ DMRC ถึงพื้นดิน กระแสไอออนมีค่าต่ำกว่า 1 nA/m^2 .



(ก) กรณีไม่มีสายตัวนำ DMRC

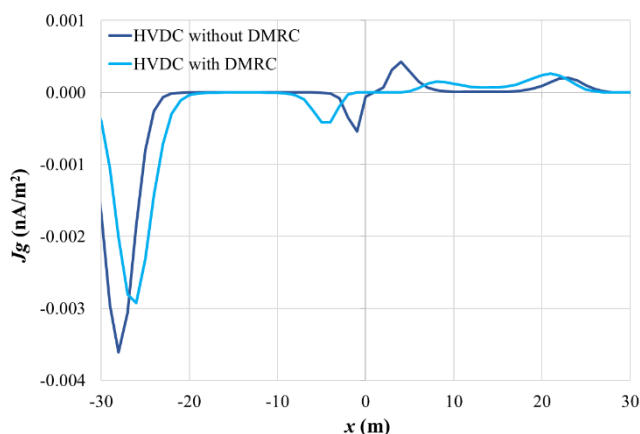


(ข) กรณีมีสายตัวนำ DMRC

รูปที่ 6.18 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไอออนของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC เมื่อไม่มีลม

การพิจารณาด้วยค่า $J_{diffuse}$ ค่าตอบของผลการจำลองที่ระดับพื้นดินเลือกใช้ที่ความสูง 3 mm . รูปที่ 6.19 แสดงผลการจำลองที่ระดับพื้นดินของ J_g เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีและ

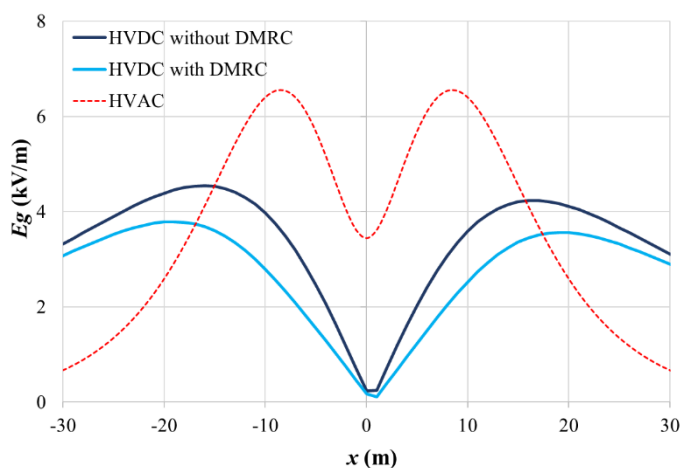
กรณีที่มีสายตัวนำ DMRC. J_g สำหรับสายส่ง HVDC ทั้งสองกรณี มีค่าสูงสุดต่ำกว่า 0.004 nA/m^2 และมีตำแหน่งอยู่ใกล้ ROW ของสายตัวนำขั้วลบดังรูปที่ 6.19.



รูปที่ 6.19 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC เมื่อไม่มีลม

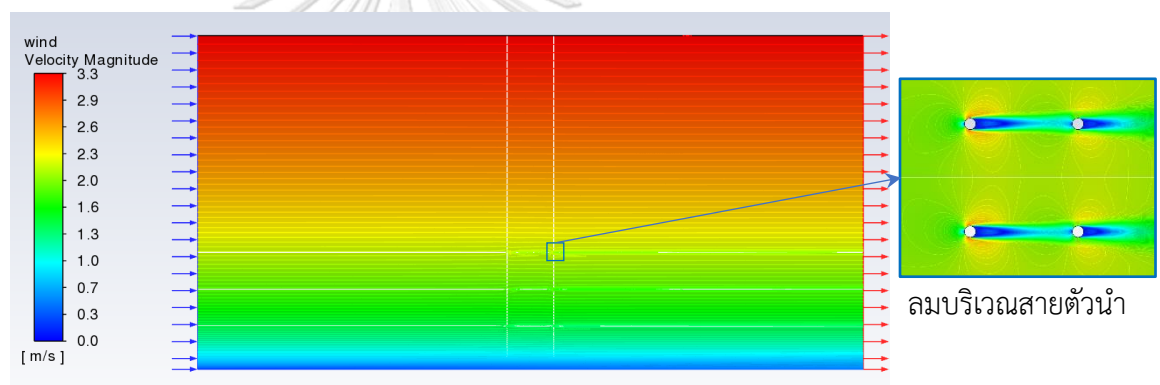
เนื่องจากสายส่ง 500 kV HVAC เดิมมีเขตเดินสาย (Right of way; ROW) กว้าง 60 m . ดังนั้นผลการจำลองของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC จึงวิเคราะห์คำตอบภายใน ROW ช่วงระยะ $x \leq \pm 30 \text{ m}$ เช่นกัน. รายละเอียดขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง HVAC แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก 3.6.

รูปที่ 6.20 แสดงค่า E_g สำหรับสายส่ง HVDC เปรียบเทียบกับสายส่ง HVAC. ค่าสูงสุดของ E_g ของสายส่ง HVDC ทั้งสองกรณี มีค่าต่ำกว่า E_g ของสายส่ง HVAC และเลื่อนออกห่างจากกึ่งกลางสายส่ง ($x = 0 \text{ m}$). สนามไฟฟ้าที่ ROW ($x = \pm 30 \text{ m}$) ของสายส่ง HVDC สูงกว่า HVAC ประมาณ 2.4 kV/m . การติดตั้งสายตัวนำ DMRC ช่วยลดค่า E_g ที่จุดสูงสุดและ ROW ได้ประมาณ 17% และ 7% ตามลำดับ.

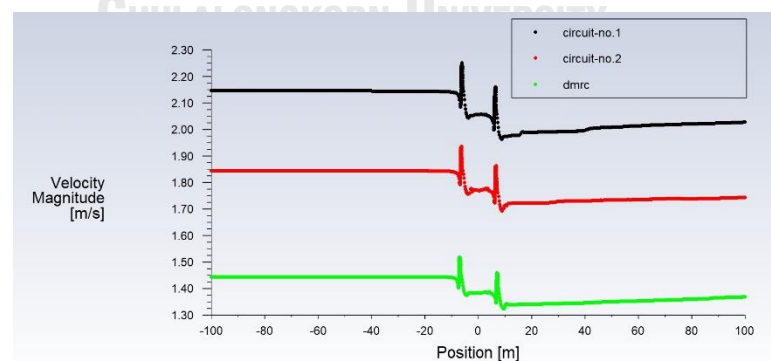


รูปที่ 6.20 ขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC เมื่อไม่มีลม

เมื่อจำลองในสภาวะที่มีลม การจำลองกำหนดให้ velocity inlet ของแบบจำลอง รูปที่ 3.10(ก) มีความเร็วลม $w_r = 1.3$ m/s และ $\alpha = 0.4$ พัดจากสายตัวนำซ้ายลบบนไปซ้ายบน. ความเร็วลมที่จำลองได้จนมีค่าคงตัว (steady values) ทุกบริเวณแสดงได้ดังรูปที่ 6.21. การไหลแบบราบเรียบของลมเริ่มมีความปั่นป่วนที่บริเวณอากาศรอบกลุ่มสายตัวนำดังรูปที่ 6.21(ก). ความเร็วลมสูงเพิ่มขึ้นที่ผิวสายตัวนำด้านบนและด้านล่าง และลดต่ำลงเกือบเป็นศูนย์ที่ด้านหลังของผิวสายตัวนำ. รูปที่ 6.21(ข) แสดงความเร็วลมที่ความสูงสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 และ 1.8 m/s ใกล้เคียงกับผลคำนวณจากสมการที่ 2.31 (ความเร็วลมที่คำนวณได้เท่ากับ 2.15 และ 1.85 m/s สำหรับสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 และ 2 ตามลำดับ). ความเร็วลมที่ไหลผ่านผิวสายตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น 0.1 m/s และลดต่ำลงทันทีเมื่อไหลผ่านสายตัวนำ. การจำลองสายส่ง ± 500 kV HVDC ผู้วิจัยสมมติให้ความเร็วลมคงตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าใดๆ ตามการเคลื่อนที่ของไอออนในอากาศ.



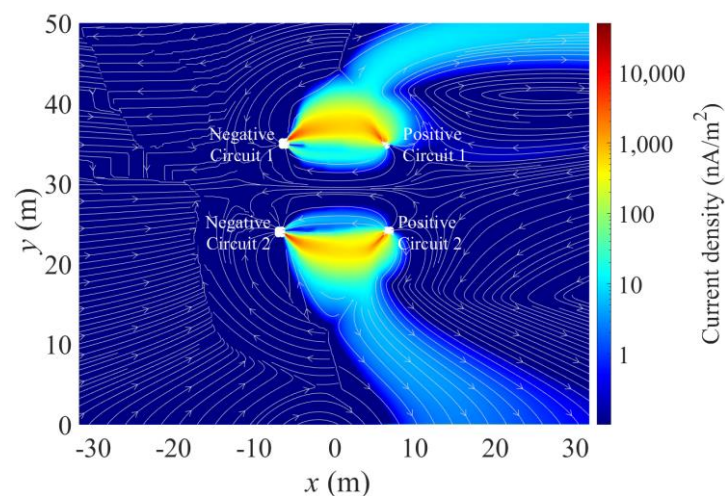
(ก) เส้นทางการไหลของลม



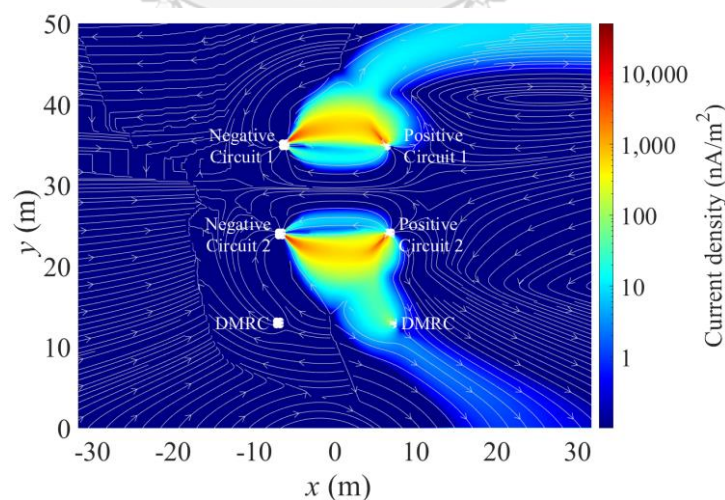
(ข) ความเร็วลมที่ระดับสายตัวนำ

รูปที่ 6.21 ผลการจำลองความเร็วลมของสายส่ง ± 500 kV HVDC

ผลการจำลองเปรียบเทียบกระแสไอออนเมื่อมีความเร็วลม $w_r = 1.3$ m/s และ $\alpha = 0.4$ พัดจากสายตัวนำขั้วลบไปขั้วบวกแสดงได้ดังรูปที่ 6.22. กระแสไอออนบางส่วนไหลไปทางด้านปลายลม (downwind). กรณีที่ไม่มีสายตัวนำ DMRC ในรูปที่ 6.22(ก) กระแสไอออนของกลุ่มวงจร 2 ไหลลงสู่พื้นดินเป็นบริเวณกว้าง 24 m. กรณีที่มีสายตัวนำ DMRC ความกว้างของกระแสไอออนบริเวณพื้นดินลดลงเหลือ 18 m. เนื่องจากกระแสไอออนที่มีความหนาแน่นสูงไปอยู่ที่สายตัวนำ DMRC จึงสามารถลดทอนกระแสไอออนก่อนไหลลงสู่พื้นดินได้ดังรูปที่ 6.22(ข).



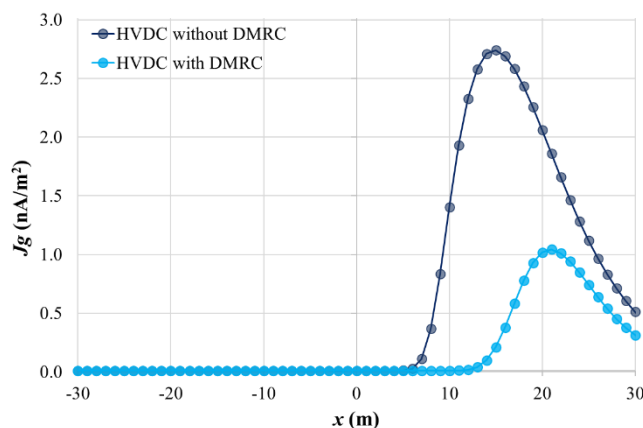
(ก) กรณีไม่มีสายตัวนำ DMRC



(ข) กรณีมีสายตัวนำ DMRC

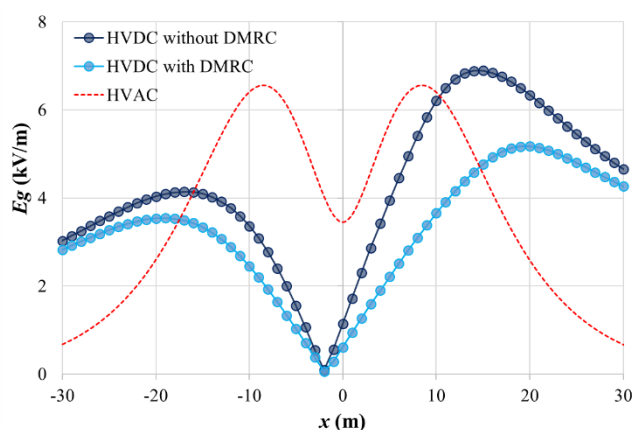
รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไอออนของสายส่ง ± 500 kV HVDC เมื่อมีลม

J_g ที่ระดับพื้นดินของทั้งสองกรณีในรูปที่ 6.23 มีค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนอยู่ใต้สายตัวนำชั่วคราวเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีลม. กระแสไอออนทางด้านต้นลม (upwind) หรือบริเวณใต้สายตัวนำชั่วคราวถูกลดหายไปเนื่องจากลมพัด. กรณีที่ไม่มีสายตัวนำ DMRC มีค่าสูงสุด $J_g = 2.7 \text{ nA/m}^2$ อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 15 \text{ m}$. กรณีมีสายตัวนำ DMRC มีค่าสูงสุด $J_g = 1 \text{ nA/m}^2$ ลดลงประมาณ 63% และมีตำแหน่งเลื่อนเข้าไปใกล้ ROW อยู่ที่ $x = 20 \text{ m}$.



รูปที่ 6.23 ความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC เมื่อมีลม

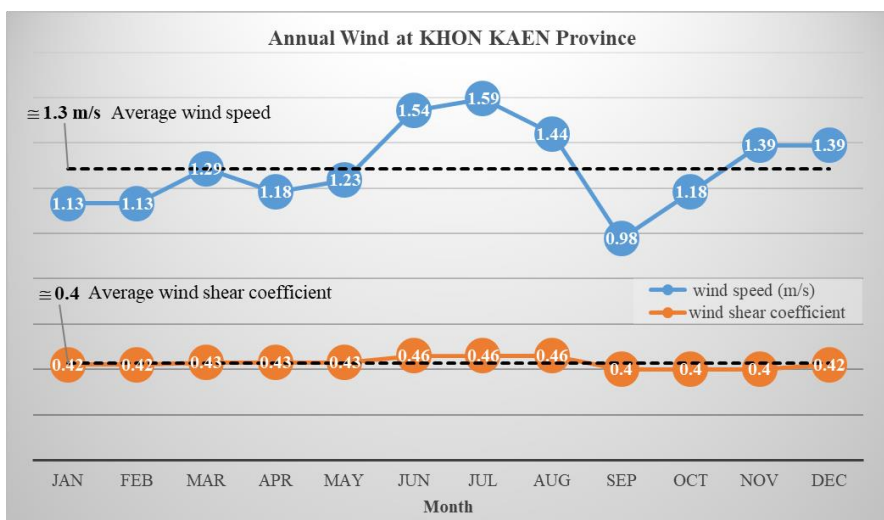
E_g ของทั้งสองกรณีในรูปที่ 6.24 มีค่าสูงขึ้นชัดเจนทางด้านสายตัวนำชั่วคราวเช่นเดียวกับ J_g และปรับลดลงเล็กน้อยทางด้านสายตัวนำชั่วคราว. กรณีที่ไม่มีสายตัวนำ DMRC ค่าสูงสุด E_g สูงกว่าสายส่ง HVAC $\approx 0.4 \text{ kV/m}$. การติดตั้งสายตัวนำ DMRC ช่วยลดค่า E_g ที่จุดสูงสุดได้ประมาณ 25% และมีค่าต่ำกว่า E_g ของสายส่ง HVAC. เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ ROW กับกรณีที่ไม่มีลม E_g ที่ตำแหน่ง $x = 30 \text{ m}$ สูงขึ้น 48% และที่ตำแหน่ง $x = -30 \text{ m}$ ลดลง 9%. รายละเอียดของผลการจำลองที่ระดับพื้นดินเพื่อเปรียบเทียบกรณีไม่มีและมีสายตัวนำ DMRC แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ง3.7 และ ง3.8 ตามลำดับ.



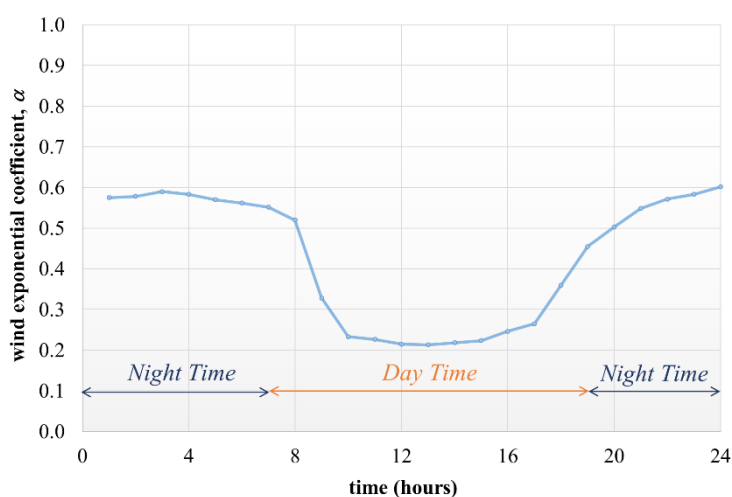
รูปที่ 6.24 ขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินของสายส่ง $\pm 500 \text{ kV}$ HVDC เมื่อมีลม

6.5.2 การวิเคราะห์ผลของลม

การจำลองใช้ข้อมูลสภาพอากาศของจังหวัดขอนแก่นในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงค่า J_g และ E_g ที่ระดับพื้นดิน. สถิติความเร็วลมรายปีมีค่าเฉลี่ย $W_r-avg = 1.3$ m/s และค่าสูงสุด $W_r-max = 1.6$ m/s แสดงดังรูปที่ 6.25 [39]. สัมประสิทธิ์แรงลมเดือนรายปีมีค่าเฉลี่ย $\alpha_{avg} = 0.4$ ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง $\alpha_{min} = 0.2$ ในเวลากลางวันและ $\alpha_{max} = 0.6$ ในเวลากลางคืน ดังรูปที่ 6.26 [40].

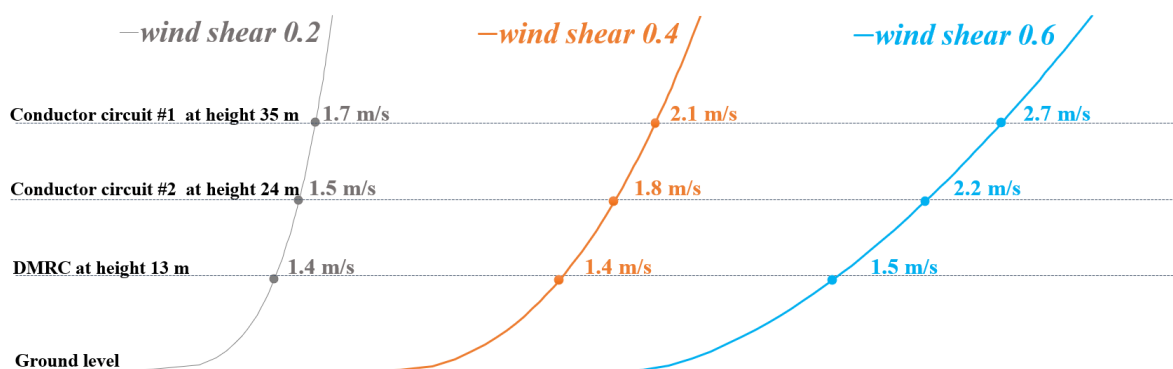


รูปที่ 6.25 สถิติความเร็วลมและสัมประสิทธิ์แรงลมเดือนรายปี



รูปที่ 6.26 สัมประสิทธิ์แรงลมเดือนในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

รูปแบบสายส่ง ± 500 kV HVDC ที่มีสายตัวนำ DMRC จำลองด้วยลม 2 รูปแบบ ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน. ลมพัดเข้าทางสายตัวนำข้างบวกไปข้างลบ เรียกแทนด้วย “P-to-N wind” และลมพัดเข้าทางสายตัวนำข้างลบไปข้างบวกเรียกแทนด้วย “N-to-P wind”. รูปแบบความเร็วลมที่ความสูงระดับสายตัวนำ เมื่อกำหนด $w_{r-avg} = 1.3$ m/s และปรับค่า $\alpha = 0.2, 0.4$ และ 0.6 แสดงดังรูปที่ 6.27. ค่าของ α ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วลมที่สายตัวนำสูงขึ้นและมีความเร็วลมแตกต่างกันมากขึ้นระหว่างสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 และ 2.



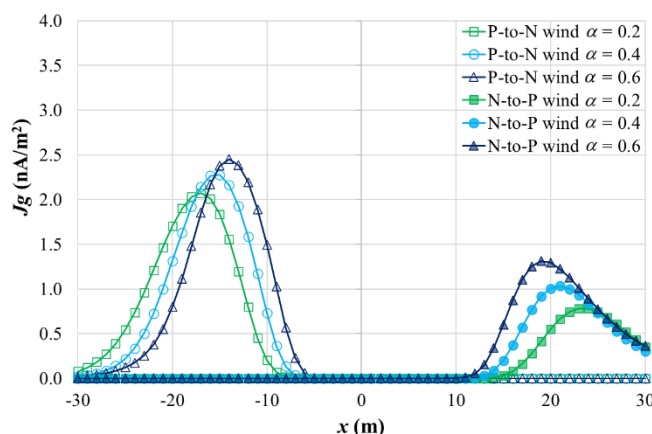
รูปที่ 6.27 รูปแบบความเร็วลมที่ความสูงระดับสายตัวนำ

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนที่ความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s

Wind direction	$\alpha_{min} = 0.2$	$\alpha_{avg} = 0.4$	$\alpha_{max} = 0.6$
P-to-N wind			
N-to-P wind			

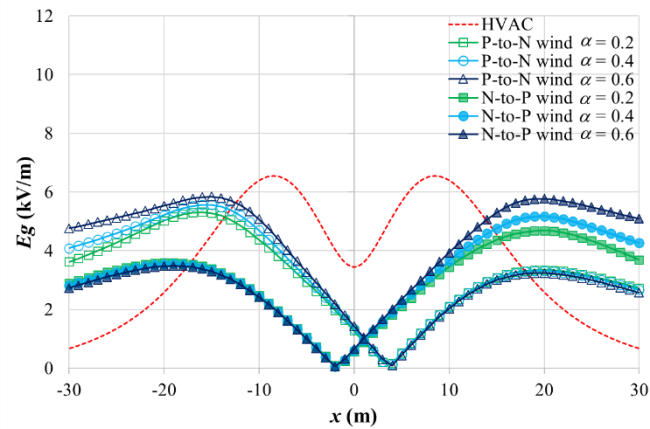
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลของลมที่มีต่อความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อปรับค่า α . กระแสไอออนที่มีค่าสูงระหว่างสายตัวนำแรงสูงชั่วคราวและลบไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า α แต่ทางด้านปลายลมของสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 กระแสไอออนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ α_{\max} . กระแสไอออนไหลลงพื้นดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและเลื่อนเข้าใกล้กึ่งกลางสายส่ง ($x = 0$ m) เล็กน้อยเมื่อปรับเพิ่มค่า α . กระแสไอออนเมื่อลมมีทิศทาง P-to-N ไหลลงสู่พื้นดินเป็นบริเวณกว้าง และมีความหนาแน่นสูงกว่ากระแสไอออนเมื่อลมมีทิศทาง N-to-P.

รูปที่ 6.28 แสดงผลการจำลองที่ระดับพื้นดินของขนาด J_g เมื่อปรับค่า α ที่ความเร็วของลม $w_{r-avg} = 1.3$ m/s. J_g จากลมทั้งสองทิศทางมีแนวโน้มกระแสไอออนทางด้านต้นลมลดหายไปเนื่องจากลมพัด และเหลือแต่กระแสไอออนทางด้านปลายลมเท่านั้นที่เพิ่มสูงขึ้น. เมื่อปรับค่า α_{avg} จุดสูงสุดของ J_g มีค่าเพิ่มขึ้นที่ α_{\max} และลดลงที่ α_{\min} อยู่ในช่วง ± 0.23 nA/m². ทิศทางลมแบบ P-to-N มีจุดสูงสุดของ J_g สูงกว่าประมาณสองเท่า และมีตำแหน่งสูงสุดอยู่ใกล้กึ่งกลางสายส่งมากกว่า 5 m เมื่อเปรียบเทียบกับขนาด J_g เมื่อลมมีทิศทาง N-to-P.



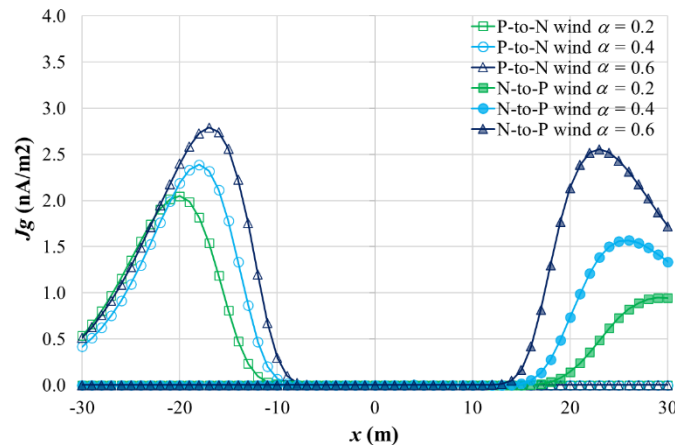
รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบขนาดกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s

รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบผลจากลมทั้งสองทิศทางที่มีต่อขนาดสนามไฟฟ้า E_g . สนามไฟฟ้าของสายส่ง HVDC จากลมทั้งสองทิศทางมีค่าสูงสุดปรับเพิ่มขึ้นทางด้านปลายลมและมีค่าสูงสุดเท่าเดิมทางด้านต้นลม. ค่าสูงสุดของ E_g ในทิศทางลม P-to-N แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อปรับค่า α . สนามไฟฟ้าสูงสุดจากลมทั้งสองทิศทางมีค่าเท่ากันที่ α_{\max} เท่ากับ 5.8 kV/m และอยู่ที่ตำแหน่ง $x = \pm 20$ m. ผลการจำลองของสายส่ง HVDC ที่ w_{r-avg} สรุปได้ว่า ค่า E_g ที่จุดสูงสุดต่ำกว่าสายส่ง HVAC แต่ค่า E_g ที่ตำแหน่งขอบเขต ROW ($x = \pm 30$ m) ยังคงสูงกว่าสายส่ง HVAC ประมาณ 2 - 4 kV/m.



รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s

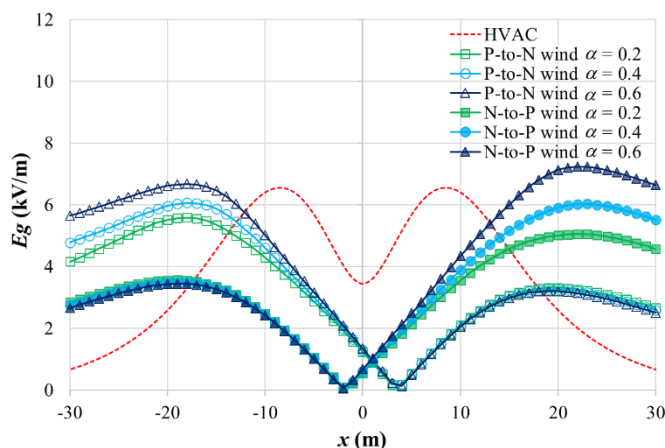
รูปที่ 6.30 แสดงขนาด J_g ที่ระดับพื้นดิน เมื่อปรับเพิ่มความเร็วลมเป็น $w_{r-max} = 1.6$ m/s. ตำแหน่งจุดสูงสุดของ J_g จากลมทั้งสองทิศทางเลือนออกห่างจากกึ่งกลางสายส่ง ประมาณ 3 – 6 m. การปรับค่า α ทำให้จุดสูงสุดของ J_g มีค่าแตกต่างกันได้ชัดเจนมากที่ลมในทิศทาง N-to-P. จุดสูงสุดของ J_g เมื่อลมมีทิศทาง N-to-P อยู่ใกล้ตำแหน่งขอบเขต ROW และมีค่าสูงชันอย่างมาก = 2.6 nA/m² ใกล้เคียงกับขนาด J_g เมื่อลมมีทิศทาง P-to-N.



รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบขนาดกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมสูงสุด 1.6 m/s

สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.31 มีค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นและแนวโน้มเปลี่ยนแปลงชัดเจนขึ้นจากการปรับค่า α เช่นเดียวกับ J_g . ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นเป็น w_{r-max} ส่งผลให้ค่าสูงสุด E_g เมื่อลมมีทิศทาง N-to-P สูงเท่ากับที่ α_{avg} และสูงมากกว่าที่ α_{max} เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ลมมีทิศทาง P-to-N. ผลการจำลอง E_g ของสายส่ง HVDC จากลมทั้งสองทิศทางที่ w_{r-max} มีค่า

สูงกว่าสนามไฟฟ้าสายส่ง HVAC ทั้งที่ตำแหน่งจุดสูงสุดและที่ขอบเขต ROW. รายละเอียดของผลการจำลองที่ระดับพื้นดินเพื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของลมที่ $W_r\text{-avg}$ และ $W_r\text{-max}$ แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ง3.9.1 ถึง ง3.9.4.



รูปที่ 6.31 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินเมื่อมีความเร็วลมสูงสุด 1.6 m/s

6.5.3 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ

การจำลองพิจารณาที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของสายตัวนำ 1272 MCM และสภาพแวดล้อมอากาศเท่ากับ 75 °C และ 32 °C ตามลำดับ เมื่อมีความเร็วลม 0.6 m/s (มาตรฐานสายตัวนำ ACSR ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย). เงื่อนไขความร้อนจากกระแสไฟฟ้าและความเข้มแสงอาทิตย์เป็นไปตามตารางที่ 3.4 กำหนดบนพื้นที่ชั้นอะลูมิเนียมของสายตัวนำ. กรณีที่ไม่มีลม ตั้งค่าจำลองให้ผิวสายตัวนำถ่ายเทความร้อนออกได้ด้วยการพาตามธรรมชาติและการแผ่รังสี. กรณีที่มีลม สายตัวนำถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มอีกด้วยทิศทางลมพัดจากสายตัวนำซ้ายไปขวาวก. ความเร็วลมในแบบจำลองเท่ากับ $W_r\text{-spec} = 0.6$ m/s และมีสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือน $\alpha_{avg} = 0.4$.

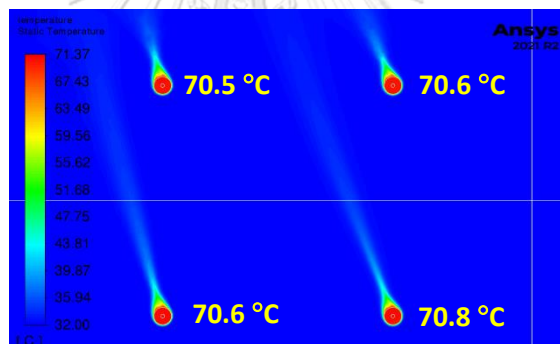
ผลการจำลองของสายส่ง ± 500 kV HVDC ที่มีสายตัวนำ DMRC มีค่าอุณหภูมิของสายตัวนำแต่ละกลุ่มวงจรแสดงดังตารางที่ 6.3. กรณีที่มีลม $W_r\text{-spec} = 0.6$ m/s อุณหภูมิที่จำลองได้ของสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของมาตรฐานมีความแตกต่างประมาณ 75 ± 2 °C. กรณีที่ไม่มีลมอุณหภูมิที่จำลองได้ของสายตัวนำทั้งสองกลุ่มวงจรมีค่าต่ำกว่า 75 °C. อุณหภูมิของสายตัวนำกลุ่มวงจร 2 มีค่าสูงกว่ากลุ่มวงจร 1 เนื่องจากอยู่ใกล้พื้นดินและมีความเร็วลมที่ต่ำกว่า. สายตัวนำ DMRC มีอุณหภูมิที่จำลองได้เท่ากับสภาพแวดล้อมอากาศ. กรณีที่ไม่มีลมสายตัวนำแต่ละเส้นของสายควมมีอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ($\Delta T_{cond} < 0.3$ °C). เมื่อมีลมพัด อุณหภูมิ

ของสายตัวนำควบเริ่มมีค่าแตกต่างกันขึ้นตามความเร็วลม ($\Delta T_{cond} < 1.4^{\circ}\text{C}$ สำหรับ w_{r-spec}).

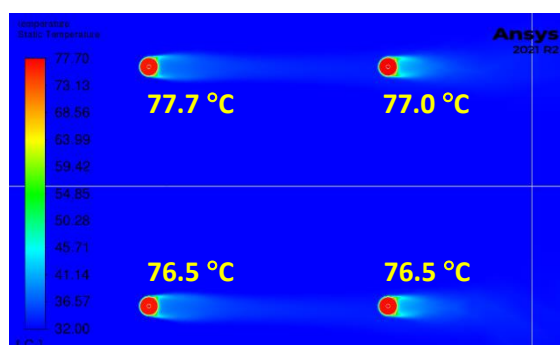
ตารางที่ 6.3 ผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำ (สายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC)

กรณีของการจำลอง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)				
	สายตัวนำกลุ่มวงจร 1 (ที่ความสูง 35 m)		สายตัวนำกลุ่มวงจร 2 (ที่ความสูง 24 m)		สายตัวนำ กลุ่ม DMRC (ที่ความสูง 13 m)
	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	
$w_{r-spec} = 0$ m/s (ไม่มีลม)	68.1 – 68.3	67.5 – 67.9	71.0 – 71.3	70.5 – 70.8	32.02 – 32.07
$w_{r-spec} = 0.6$ m/s $\alpha_{avg} = 0.4$	72.9 – 74.1	73.6 – 74.9	76.1 – 77.0	76.5 – 77.7	32.00 – 32.04

หมายเหตุ * กรณีที่มีเงื่อนไขตรงกับการใช้งานตามมาตรฐานสายตัวนำ ACSR ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



(ก) กรณีที่ไม่มีลม



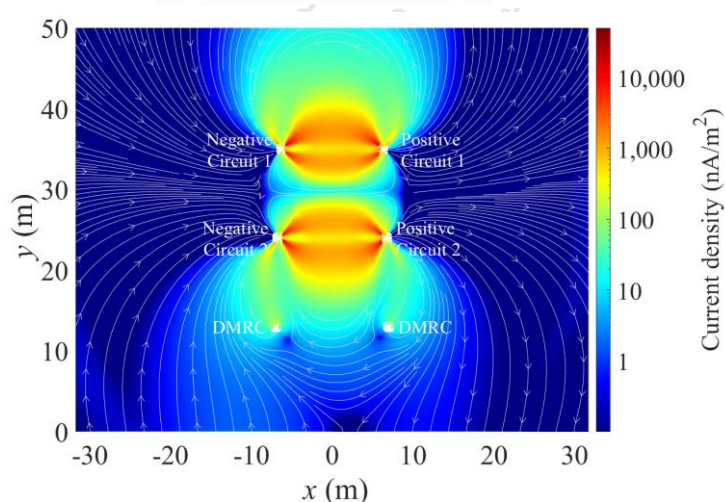
(ข) กรณีที่มีลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s

รูปที่ 6.32 ผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำซ้ายขวาของกลุ่มวงจร 2

รูปที่ 6.32 แสดงผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำขั้วบวกของกลุ่มวงจร 2 ของในแต่ละกรณี. ชั้นบางๆ (≈ 2 mm) ของอากาศโดยรอบผิวสายตัวนำมีค่าอุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนในหัวข้อ 5.2. ในกรณีที่ไม่มีลมในรูปที่ 6.32(ก) อากาศร้อนที่มีความหนาแน่นต่ำจะลอยตัวขึ้นด้านบน. ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่จำลองได้ของสายตัวนำกลุ่มวงจร 1 และ 2 เท่ากับ 69.4 ± 2 °C มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งกรณีสายตัวนำ 1 เส้น (73 ± 7 °C) และ 2 เส้น (63 ± 12 °C). ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสายตัวนำในผลการจำลองมีค่าน้อยกว่าผลการวัดอุณหภูมิ.

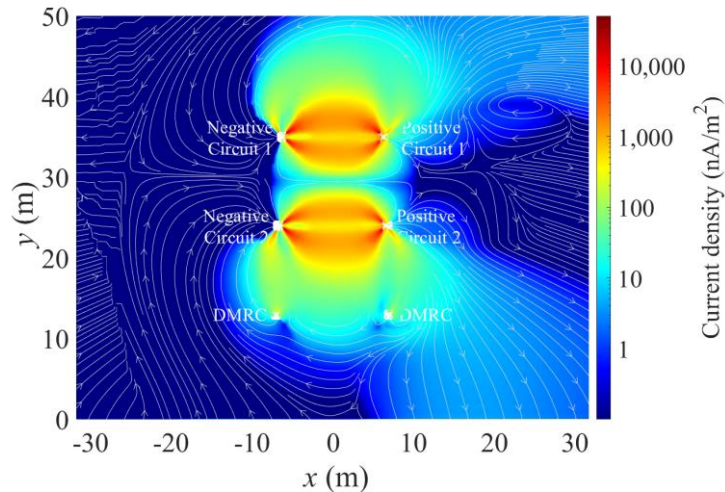
ในกรณีที่ไม่มีลมในรูปที่ 6.32(ข) อากาศร้อนถูกลมพัดไปอยู่ด้านหลังของสายตัวนำ. อากาศในบริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ δ และสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา E_c มีค่าลดลงตามสมการที่ (2.2). โคโรนาดีสชาร์จจึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากขึ้นที่ตำแหน่งด้านหลังของสายตัวนำส่งผลให้กระแสไอออนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทางด้านท้ายลม.

ผลการจำลองของกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิสายตัวนำและอากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 6.33. ในกรณีที่ไม่มีลม กระแสไอออนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมากทั้งบริเวณสายตัวนำและใกล้พื้นดิน เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไอออนในรูปที่ 6.18(ข). กระแสไอออนที่มีความหนาแน่นสูงกระจายออกมาเป็นบริเวณกว้างขึ้นอยู่ระหว่างสายตัวนำแรงสูงขั้วบวกและลบ. ช่องว่างระหว่างสายตัวนำกลุ่มวงจร 2 และสายตัวนำ DMRC มีกระแสไอออนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง $10\text{--}100$ nA/m². ไอออนบางส่วนที่อยู่ห่างจากการชิลด์ของสายตัวนำ DMRC จึงไหลออกทางด้านข้าง และตกลงสู่พื้นดินในขอบเขต ROW.



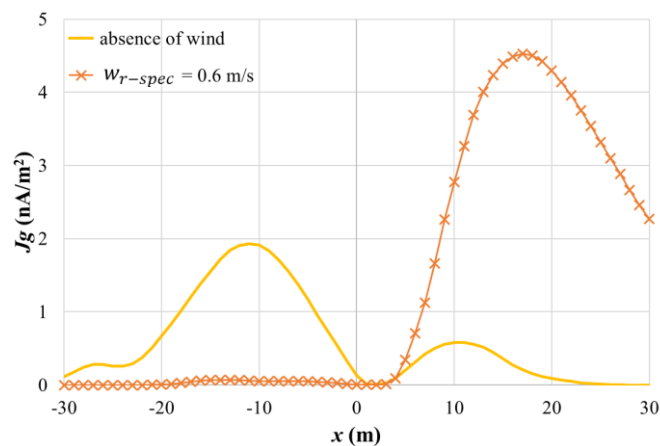
รูปที่ 6.33 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ กรณีไม่มีลม

ในกรณีที่มีลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s ในรูปที่ 6.34 กระแสไอออนที่สายตัวนำไหล เบี่ยงเบนไปตามทิศทางของลมทางด้านสายตัวนำซ้ายบวก. ความหนาแน่นกระแสไอออนด้านสายตัวนำ ขั้วบวกจึงเพิ่มขึ้นที่บริเวณพื้นดิน และมีบางส่วนกระจายออกไปนอกขอบเขต ROW.



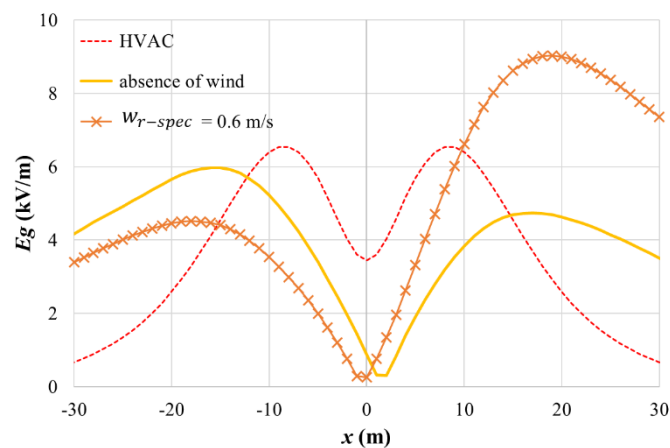
รูปที่ 6.34 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ กรณีมีลม 0.6 m/s

รูปที่ 6.35 แสดงผลการจำลองที่ระดับพื้นดินของ J_g เมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ. กรณีไม่มีลม ผลการจำลอง J_g เพิ่มขึ้น > 1000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 6.19. ค่าสูงสุดของ J_g อยู่ใต้สายตัวนำขั้วลบ และตำแหน่งจุดสูงสุดเลื่อนมาอยู่ใกล้กึ่งกลางสายส่งที่ $x = \pm 11$ m. กรณีมีลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s กระแสไอออนใต้สายตัวนำขั้วลบลดลงเข้าใกล้ศูนย์. ขนาดของ J_g สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 4.5 nA/m² อยู่ใต้สายตัวนำขั้วบวกที่ $x = 17$ m.



รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบขนาดความหนาแน่นกระแสไอออนเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิของสายตัวนำ

ผลการจำลอง E_g ในรูปที่ 6.36 มีแนวโน้มคล้ายกันกับผลการจำลอง J_g . กรณีไม่มีลม ผลการจำลอง E_g มีค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นจากกราฟรูปที่ 6.20 จากเดิม 3.6 kV/m ไปเป็น 6.0 และ 4.7 kV/m ได้สายตัวนำซ้ายและขวาวกตามลำดับ. ในกรณีที่มียลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s ค่าสูงสุด E_g ลดลงได้สายตัวนำซ้าย แต่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าสายส่ง HVAC ≈ 2.5 kV/m อยู่ตำแหน่งได้สายตัวนำขวาวกที่ $x = 19$ m. ขอบเขต ROW ที่ $x = 30$ m สนามไฟฟ้าของสายส่ง HVDC สูงมากกว่า HVAC ≈ 6.8 kV/m. รายละเอียดของผลการจำลองที่ระดับพื้นดินวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิกรณีไม่มีลมและกรณีมีลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s แสดงอยู่ในตารางภาคผนวก ง3.10.



รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบขนาดสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ

6.5.4 การวิเคราะห์ข้อจำกัดของสายส่ง ± 500 kV HVDC

ผลการจำลองของสายส่ง ± 500 kV HVDC ในหัวข้อ 6.5.1–6.5.3 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไอออนและสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้จากสภาพแวดล้อมของอากาศ. พารามิเตอร์ของอากาศที่สำคัญ ได้แก่ ความเร็วลม, ทิศทางของลม, สัมประสิทธิ์แรงลมเฉือน, อุณหภูมิของสายตัวนำและอากาศรอบสายตัวนำ มีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของไอออนบริเวณใต้สายส่ง HVDC. ลมมีผลให้ความหนาแน่นกระแสไอออนเพิ่มขึ้นทางด้านปลายลม. อุณหภูมิจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ามีผลให้ความหนาแน่นกระแสไอออนเพิ่มขึ้นที่บริเวณสายตัวนำ. ดังนั้น ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g จึงมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ระดับพื้นดิน.

ข้อจำกัดของการใช้งานสายส่ง ± 500 kV HVDC คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดภายในพื้นที่ ROW ควรมีค่าไม่เกินของสนามไฟฟ้าสูงสุดของสายส่ง 500 kV HVAC. เมื่อพิจารณาผลการจำลอง

ในช่วงระยะ $x \leq \pm 30$ m พบว่า ความเร็วลม 1.6 m/s ที่ความสูงอ้างอิง 10 เมตร และสัมประสิทธิ์แรงลมเฉือนเท่ากับ 0.4 ทำให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่พื้นดินสูงกว่าข้อจำกัดที่กำหนด. สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดสูงสุดและขอบเขต ROW มีค่าเกินกว่าข้อจำกัด เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดของสายตัวนำเท่ากับ 75 °C และความเร็วลม 0.6 m/s. ดังนั้น สภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าของสายส่ง HVDC จึงขึ้นอยู่กับลมและอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามภูมิประเทศด้วย.



บทที่ 7

สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาและวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไอออนและสนามไฟฟ้าของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เป็นเครื่องมือในการจำลอง. วิธีการ FVM และสมการ UDS, UDF macros ที่เกี่ยวเนื่องกับการไหลของปริมาณสเกลาร์ ถูกประยุกต์เข้ากับสมการควบคุมการไหลของประจุในอากาศ. ผู้วิจัยใช้แบบจำลอง 2 มิติ ทั้งหมด 4 รูปแบบ หาคำตอบของศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับสายตัวนำและพื้นดิน.

รูปแบบที่ 1 เป็นการหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าของสมการปัวซองด้วยแบบจำลองประจุทรงกลม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยกฎของเกาส์. รูปแบบที่ 2 เป็นการหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าด้วยแบบจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีการเงาประจุ. ผลวิเคราะห์ทั้งสองรูปแบบพบว่า ผลการจำลองและผลเฉลยมีคำตอบใกล้เคียงกันเมื่อเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กลงและขอบเขตอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น.

รูปแบบที่ 3 เป็นการหาคำตอบความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินด้วยแบบจำลองสายส่ง HVDC ขั้วเดียวชนิดลดขนาดที่ไม่มีและมีสายชิลด์ด้านล่าง. ผลการจำลองในกรณีที่ไม่มีสายชิลด์ที่แรงดันไฟฟ้า 50, 70, 90 kV มีความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดินใกล้เคียงกับงานวิจัย [23]. ผลการจำลองกรณีมีสายชิลด์จำนวน 1, 2, 3 เส้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงในทิศทางเดียวกันกับผลการวัดของความหนาแน่นกระแสไอออนที่ระดับพื้นดิน. ค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสไอออนได้สายตัวนำลดลงได้ถึง 50% เมื่อมีจำนวนสายชิลด์เพิ่มขึ้นและระยะติดตั้งที่เหมาะสม.

รูปแบบที่ 4 เป็นการหาคำตอบความหนาแน่นกระแสไอออนและสนามไฟฟ้าด้วยแบบจำลองสายส่ง HVDC ขั้วคู่ชนิดเต็มขนาด. ผลการจำลองของสายส่ง ± 250 kV HVDC มีแนวโน้มของขนาดและตำแหน่งจุดสูงสุดของ J_g และ E_g ใกล้เคียงกับงานวิจัย [14] ทั้งกรณีไม่มีลมและมีความเร็วลม 0.5 m/s.

สำหรับผลวิเคราะห์สายส่ง ± 500 kV HVDC ผู้วิจัยใช้โครงสร้างเดิมของสายส่ง 500 kV HVAC และวิธีการจำลองรูปแบบที่ 4 หาคำตอบความหนาแน่นกระแสไอออนและสนามไฟฟ้า. ผลการใช้สายตัวนำ DMRC ติดตั้งที่เฟสด้านล่างสุด สามารถลดค่าสูงสุดของ J_g และ E_g ทั้งกรณีที่

ไม่มีลมและกรณีที่มีความเร็วลม. เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้สายตัวนำ DMRC ค่าสูงสุดของ J_g ลดลงประมาณ 63%, E_g ลดลงประมาณ 25% และต่ำกว่าสนามไฟฟ้าของสายส่ง HVAC. การศึกษาผลของลมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของ J_g และ E_g ใช้ข้อมูลสถิติของความเร็วลมและสัมประสิทธิ์แรงลมเดือนจากจังหวัดขอนแก่น. ค่าสูงสุดของ J_g และ E_g มีขนาดเพิ่มขึ้น และตำแหน่งจุดสูงสุดเลื่อนเข้าใกล้กึ่งกลางสายส่งมากขึ้น เมื่อความเร็วลมและสัมประสิทธิ์แรงลมเดือนมีค่าสูงขึ้น. ทิศทางของลมมีผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของ J_g และ E_g ซึ่งมีแนวโน้มแตกต่างกันไปตามค่าความเร็วลมและสัมประสิทธิ์แรงลมเดือนที่เลือกใช้. ผลการจำลองของอุณหภูมิที่สายตัวนำ 1272 MCM ได้ค่าอยู่ในช่วงประมาณ 68–78 °C ใกล้เคียงกับผลทดสอบวัดอุณหภูมิของสายตัวนำ. ผลการจำลองที่ความเร็วลม 0.6 m/s ได้อุณหภูมิของสายตัวนำทุกกลุ่มวงจรเท่ากับ 75 ± 2 °C ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE738 และมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในแบบจำลอง ความหนาแน่นกระแสไอออนค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ระดับสายตัวนำและพื้นดิน. ขนาดของ E_g มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าของสายส่ง HVAC ที่ตำแหน่งจุดสูงสุดและขอบเขต ROW.

ผลวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์แสดงให้เห็นว่า ลมและอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกระทบต่อโดยตรงกับสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าของสายส่ง HVDC แบบพาดในอากาศ. ข้อจำกัดของการใช้งานสายส่ง ± 500 kV HVDC คือ ความเร็วลมควรมีค่า 1.6 m/s ที่ความสูงอ้างอิง 10 เมตร และสัมประสิทธิ์แรงลมเดือนมีค่า 0.4. สนามไฟฟ้าสูงสุดในพื้นที่ ROW จึงมีค่าไม่เกินค่าเดิมของสายส่ง 500 kV HVAC. ที่อุณหภูมิสูงสุดของสายตัวนำ 75 °C และลม 0.6 m/s ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีผลทำให้ขนาดของ E_g สูงกว่าสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV HVAC ที่ตำแหน่งจุดสูงสุดและขอบเขต ROW. ดังนั้น สภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าของสายส่ง HVDC จึงจำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลของลมและอุณหภูมิในการออกแบบด้วย.

บรรณานุกรม

1. Noosuk, A., et al. *Commissioning experience of the 300 MW Thailand-Malaysia Interconnection project*. in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 2002.
2. กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยพ.ศ. 2561-2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1. ตุลาคม 2563.
3. Janischewskyj, W., P.S. Maruvada, and G. Gela. *Corona Losses and Ionized Fields of HVDC Transmission Lines*. in *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*. 1982. Paris: CIGRE.
4. CIGRE WORKING GROUP B4.60, *Designing HVDC grids for optimal reliability and availability performance*. December 2017.
5. Electrical Power Research Institute (EPRI), *Electrical Effects of HVDC Transmission Lines*. December 2010.
6. Maruvada, P.S., *Corona Performance of High Voltage Transmission Lines*. 2000, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd.
7. Hayt, W.H. and John A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 8th Edition. 2012, New York USA: McGraw-Hill.
8. Kuffel, E., W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd Edition. 2000, London England: Butterworth-Heinemann.
9. Lattarulo, F. and V. Amoroso, *Filamentary ion flow: Theory and experiments*. 2014, New Jersey USA: John Wiley & Sons Inc.
10. Manwell, J.F., J.G. McGowan, and Anthony L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2nd Edition ed. December 2009, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
11. Hara, M., et al., *Influence of Wind and Conductor Potential on Distributions of Electric Field and Ion Current Density at Ground Level in DC High Voltage Line to Plane Geometry*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982. **PAS-101**(4): p. 803-814.
12. Takuma, T. and T. Kawamoto, *A Very Stable Calculation Method for Ion Flow*

- Field of HVDC Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987. **2**(1): p. 189-198.
13. Lu, T., et al., *Analysis of the Ionized Field Under HVDC Transmission Lines in the Presence of Wind Based on Upstream Finite Element Method*. IEEE Transactions on Magnetics, 2010. **46**(8): p. 2939-2942.
 14. Maruvada P.S., *Influence of Wind on the Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014. **29**(6): p. 2561-2569.
 15. Yi, Y., L. Wang, and Z. Chen, *Estimating the environmental impacts of HVDC and UHVDC lines for large-scale wind power transmission considering height-dependent wind and atmospheric stability*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022. **138**: p. 107868.
 16. Versteeg, H.K. and Malalasekera W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd Edition. 2007, Harlow England: Pearson Education Limited.
 17. Yin, H., et al., *Finite Volume-Based Approach for the Hybrid Ion-Flow Field of UHVAC and UHVDC Transmission Lines in Parallel*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011. **26**(4): p. 2809-2820.
 18. Yin, H., et al. *Time-domain finite volume method for ion-flow field analysis of bipolar high-voltage direct current transmission lines*. IET Generation Transmission and Distribution,, 2012. **6**, 785-791.
 19. Zhou, X., et al., *Simulation of Ion-Flow Field at the Crossing of HVDC and HVAC Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012. **27**(4): p. 2382-2389.
 20. Tian, F., et al., *Resultant Electric Field Reduction With Shielding Wires Under Bipolar HVDC Transmission Lines*. IEEE Transactions on Magnetics, 2014. **50**(2): p. 221-224.
 21. Zhenyu, L. and Zhao Xuezheng *Calculation of Ion Flow Field of Monopolar Transmission Line in Corona Cage Including the Effect of Wind*. Energies, 2019. **12**, DOI: 10.3390/en12203924.
 22. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society,

IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities. June 2010.

23. Fang, C., et al., *Impact Factors in Measurements of Ion-Current Density Produced by High-Voltage DC Wire's Corona.* IEEE Transactions on Power Delivery, 2013. **28**(3): p. 1414-1422.
24. Zhen, Y., et al., *A Laboratory Study on the Ion-Flow Field Model of the DC Wires in Stable Wind.* IEEE Transactions on Power Delivery, 2015. **30**(5): p. 2346-2352.
25. Cui, Y., et al., *WSN-Based Measurement of Ion-Current Density Under High-Voltage Direct Current Transmission Lines.* IEEE Access, 2019. **7**: p. 10947-10955.
26. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors.* 2013.
27. CIGRE WORKING GROUP B2.43, *Guide for thermal rating calculations of overhead lines.* December 2014.
28. Irina, M., M. Khamid, and Taylor Philip, *CFD thermal modelling of Lynx overhead conductors in distribution networks with integrated Renewable Energy Driven Generators.* Applied Thermal Engineering, 2013. **58**(1): p. 522-535.
29. Maksic, M., et al., *Cooling of overhead power lines due to the natural convection.* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019. **113**: p. 333-343.
30. Ma, X.Q., et al., *Effects of temperature and humidity on ground total electric field under HVDC lines.* Electric Power Systems Research, 2021. **190**: p. 106840.
31. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide Release 2021 R1.* January 2021: Canonsburg USA.
32. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Customization Manual, Release 2021 R1.* January 2021: Canonsburg USA.
33. Choopum, C. and B. Techaumnat. *Investigation of the Effects of Ion Diffusivity on the Ion Flow Field Simulation.* in *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).* 2022.

34. Fluke Corporation, *Models 175, 177, 179 True RMS Multimeters, Users Manual*. May 2003.
35. Tektronix Inc., *Digital Storage Oscilloscopes TBS1000 Series Datasheet*. Oct 2012.
36. HIOKI E.E. CORPORATION, *3283 Clamp on leak hi-tester, Instruction manual*. September 2006.
37. Fluke Corporation, *The Fluke 66 and 68 Infrared Thermometers, Technical Data*. 2005.
38. FLIR Systems Inc., *User's manual FLIR T10xx series*. 2016.
39. Climatological Center, *CLIMATOLOGICAL DATA FOR THE PERIOD 1982-2011*
40. Octaviani, M., K. Manomaiphiboon, and Thayukorn Prabamroong, *Wind shear coefficient at 23 wind monitoring towers in thailand*. JOURNAL OF SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT, April 2015. 6(2): p. 61-66.



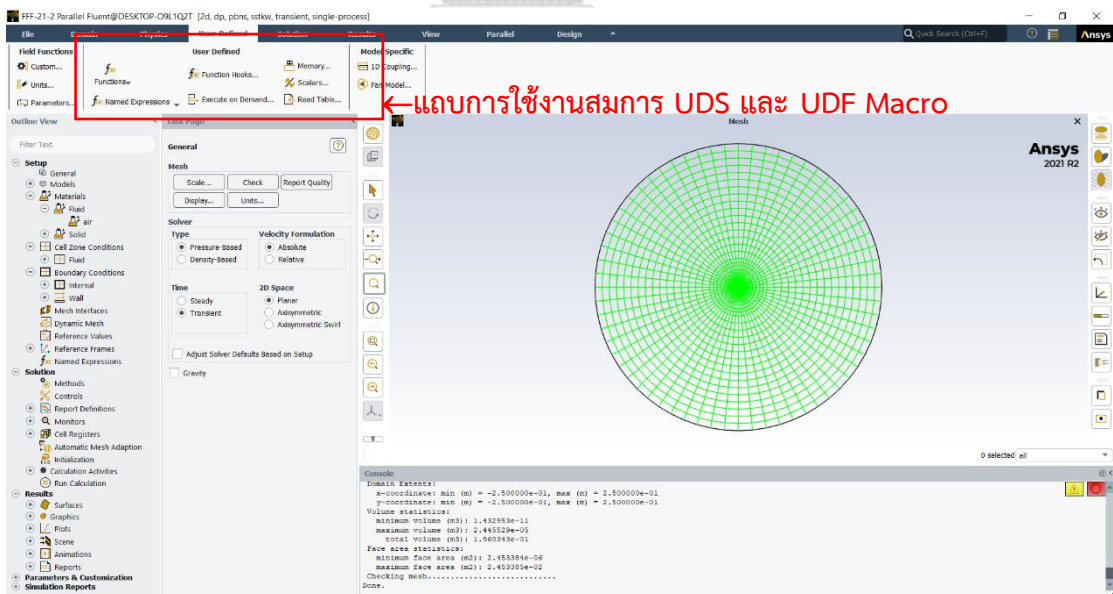
ภาคผนวก ก

การใช้งานโปรแกรม ANSYS FLUENT

ก.1 การใช้งานสมการ UDS และ UDF Macro

โปรแกรม ANSYS FLUENT เป็นโปรแกรมสำหรับจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งใช้วิธี FVM และมีสมการ User defined scalars (UDS) เป็นเครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนที่ประจุไฟฟ้าในอากาศ. การใช้งานโปรแกรมเริ่มต้นจากการนำไฟล์โดเมนที่มีโครงสร้าง mesh, cell, face, node เลือกใช้รูปแบบการจำลอง ตั้งค่าชนิดวัสดุ และสร้างเงื่อนไขต่างๆ เพื่อใช้วิเคราะห์การไหลของตัวแปรที่สนใจ ดังแสดงได้ด้วยหน้าต่างของโปรแกรม ANSYS FLUENT

ดังรูปที่ ก.1 ไอคอน  บนแถบ User-Defined สำหรับตั้งค่าใช้งานสมการ UDS และมีไอคอน  สำหรับตั้งค่าใช้งาน UDF Macro.



รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรม ANSYS FLUENT

การใช้งานสมการ UDS ประกอบไปด้วยการตั้งค่าทั้งหมด 4 ส่วนตามจำนวนพจน์ที่มีอยู่ในสมการที่ (ก.1) ดังนี้

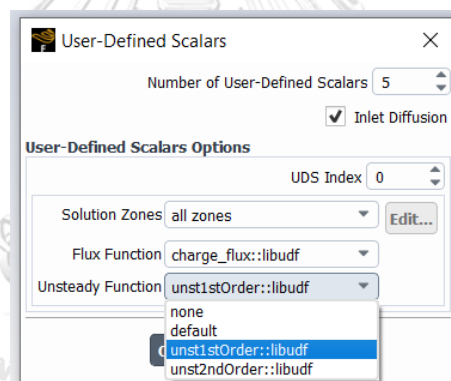
$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} ; k = 1, 2, \dots, N \quad (\text{ก.1})$$

① Unsteady ② Advection ③ Diffusion ④ Sources

พจน์ที่ 1 คือ การไหลแบบไม่คงตัวมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือปัญหาแบบ Transient สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ UDF Macro DEFINE_UDS_UNSTEADY(name, c, t, i, apu, su). การตั้งค่าอยู่ในไอคอน

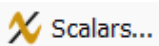


โดยเลือกจากรายการที่มีอยู่ใน Unsteady Function ดังรูปที่ ก.2. กรณีเป็นการไหลแบบคงตัวหรือปัญหาแบบ Steady state พจน์ที่ 1 นี้จะไม่ใช้งาน และเลือกตั้งค่าเป็น none.

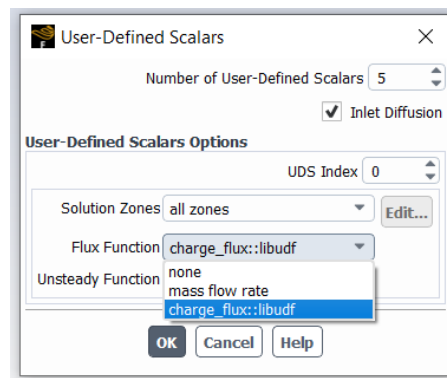


รูปที่ ก.2 หน้าต่างการตั้งค่าพจน์ที่ 1 Unsteady Function

พจน์ที่ 2 คือ การไหลแบบมีความเร็วในรูปแบบฟังก์ชันของการพา สามารถตั้งค่าได้โดยใช้


UDF Macro DEFINE_UDS_FLUX(name, f, t, i). การตั้งค่าอยู่ในไอคอน  โดยเลือก

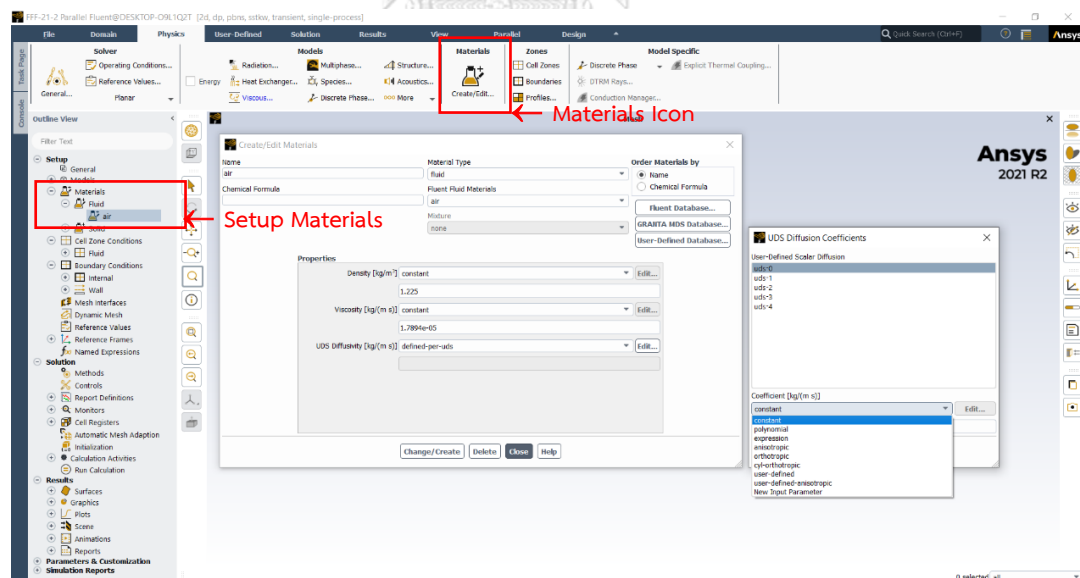
จากรายการที่มีอยู่ใน Flux Function ดังรูปที่ ก.3. กรณีไม่มีผลของการพาในของไหลที่วิเคราะห์พจน์ที่ 2 นี้จะไม่ใช้งานและเลือกตั้งค่าเป็น none.



รูปที่ ก.3 หน้าต่างการตั้งค่าพจน์ที่ 2 Flux Function

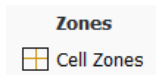
พจน์ที่ 3 คือ การแพร่ในของไหลสามารถตั้งค่าได้โดยใช้ UDF Macro DEFINE_DIFFUSIVITY

(name, c, t, i) บนแถบ Physics ซึ่งมีไอคอน  หรือเลือกที่แถบ Setup Material ทางด้านซ้ายมือดังแสดงในรูปที่ ก.4. รายการของ UDS Diffusivity Coefficients จะมีให้เลือกตั้งค่าได้ทั้งรูปแบบค่าคงที่, UDF Macro หรือรูปแบบอื่นๆตามที่ใช้งาน.




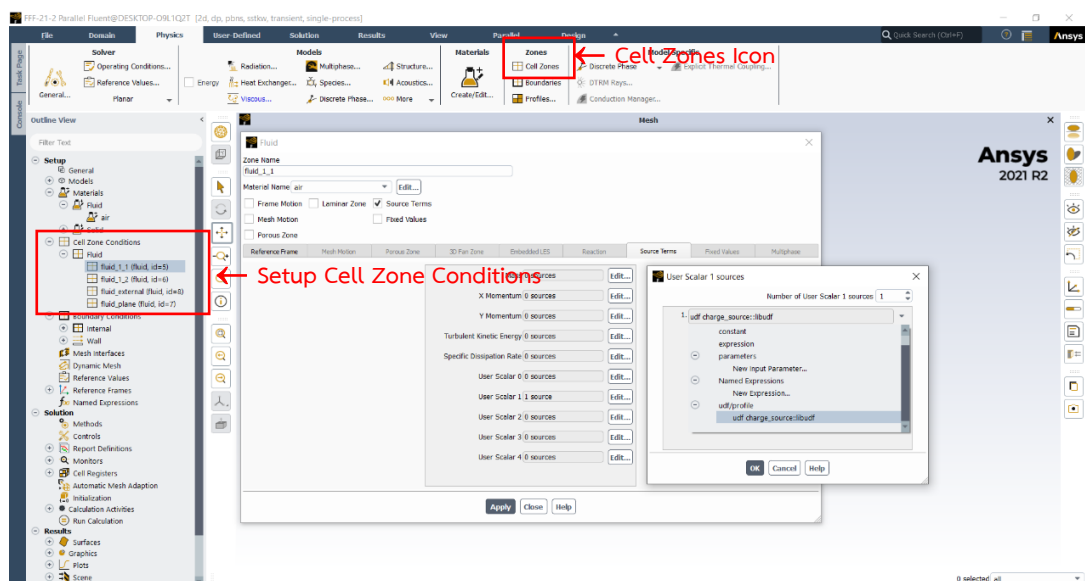
รูปที่ ก.4 หน้าต่างการตั้งค่าพจน์ที่ 3 UDS Diffusivity Coefficients

พจน์ที่ 4 คือ แหล่งกำเนิดภายนอกที่ทำให้ของไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ UDF Macro DEFINE_SOURCES(name, c, t, dS, eqn) บนแถบ Physics ซึ่งมีไอคอน



หรือเลือกที่แถบ Setup Cell Zone Conditions ทางด้านซ้ายมือดังแสดงในรูปที่ ก.5.


การทำเครื่องหมายถูกในช่องของ Source Terms  จะทำให้สามารถเข้าไปตั้งค่าแถบ Source Terms ได้ สามารถตั้งค่าเป็นรูปแบบค่าคงที่, UDF Macro หรือรูปแบบอื่นๆ ตามที่ใช้

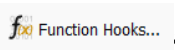


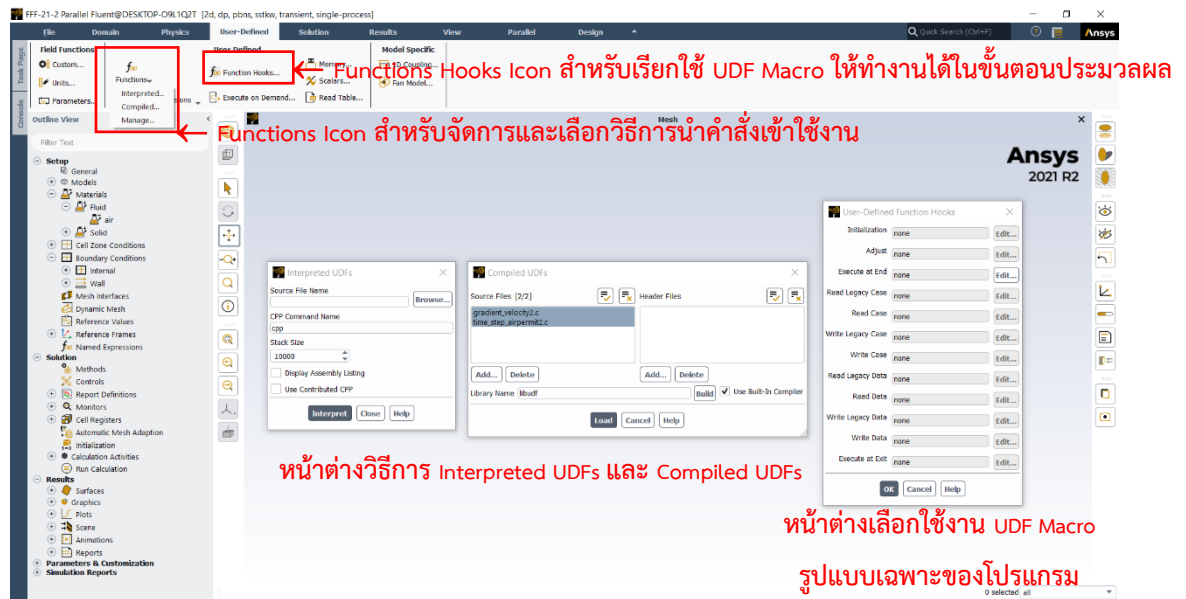
รูปที่ ก.5 หน้าต่างการตั้งค่าพจน์ที่ 4 Source Terms

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การตั้งค่าใช้งาน UDF Macro คือ การนำคำสั่งที่เขียนด้วยภาษาซีในรูปแบบเฉพาะเข้าใช้งานในโปรแกรม ANSYS Fluent ด้วยวิธีการอ่านคำสั่งทีละคำสั่ง (Interpreted UDFs) หรือวิธีการอ่านคำสั่งทั้งหมดเป็นภาษาเครื่องคอมพิวเตอร์ (Compiled UDFs). หากต้องการให้คำสั่งทำงานได้ในขั้นตอนประมวลผลโปรแกรม จะมีอีกหนึ่งขั้นตอนเพิ่มขึ้นเรียกว่า Function Hooks เพื่อเลือก

รูปแบบ UDF Macro ที่จะใช้งาน. ในไอคอน  มีรายการสำหรับเลือกวิธีการนำคำสั่ง

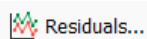
UDF Macro ใช้งานและในไอคอน  มีรายการเลือก UDF Macro รูปแบบเฉพาะของโปรแกรมให้ทำงานได้ โดยมีหน้าต่างของแต่ละไอคอนแสดงไว้ในรูปที่ ก.6.



รูปที่ ก.6 หน้าต่างการตั้งค่าใช้งาน UDF Macro

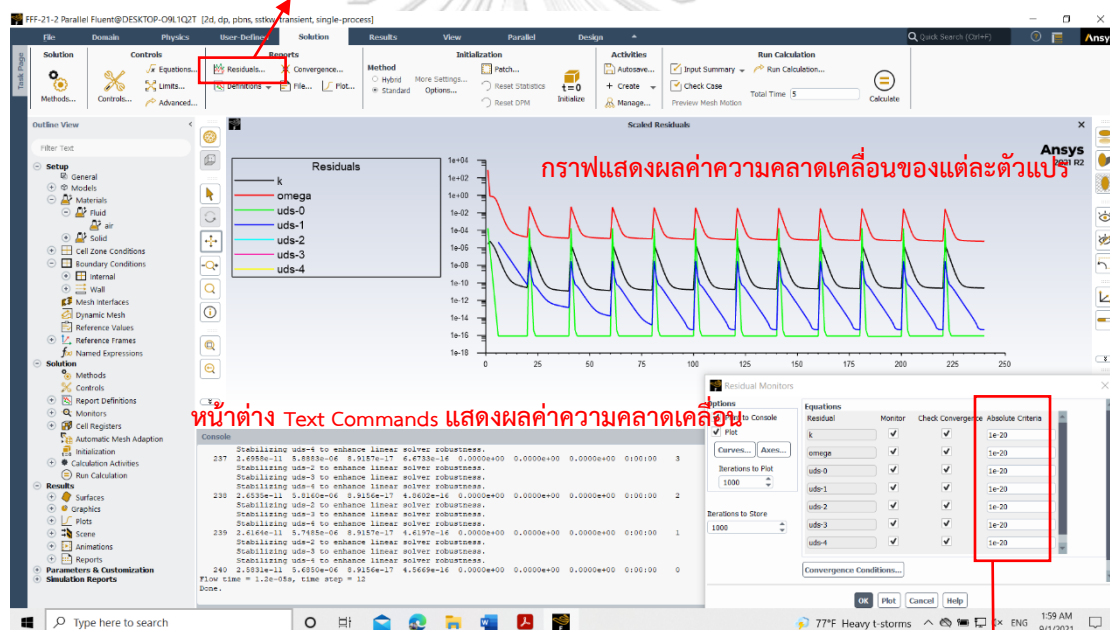
ก.2 การตั้งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ

การตั้งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบของโปรแกรม ANSYS FLUENT อยู่ในไอคอน



บนแถบ Solution ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ก.7. การเลือกกำหนดความคลาดเคลื่อนของคำตอบแต่ละตัวแปรทำได้โดยพิมพ์ตัวเลขในช่อง Absolute criteria. โปรแกรมจะแสดงผลความคลาดเคลื่อนของแต่ละตัวแปรที่เลือกไว้ในรูปแบบกราฟและ Text commands ระหว่างการประมวลผลเพื่อใช้พิจารณาการลู่เข้าของคำตอบได้. การประมวลผลของโปรแกรมอาจจะได้ผลตาม Absolute criteria หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย เช่น iterations, total time/time steps เป็นต้น จึงจำเป็นต้องตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปวิเคราะห์ทุกครั้ง.

Residual Icon สำหรับการตั้งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ



Absolute Criteria สำหรับกำหนดค่าแต่ละตัวแปร

รูปที่ ก.7 หน้าต่างการตั้งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ

ภาคผนวก ข

การกำหนด UDS และ UDF ในแบบจำลอง

ข.1 UDF Macro สำหรับการหาคำตอบสนามไฟฟ้าจากแบบจำลองสายตัวนำเหนือพื้นดิน

```
#include "udf.h"          → Compiler directive คำสั่งเริ่มต้น UDF เพื่อเรียกใช้ Macros ที่มีอยู่ในโปรแกรม FLUENT

DEFINE_EXECUTE_AT_END(post_end) → Fluent DEFINE macro กำหนดชื่อคำสั่ง
{
    Thread *t;             → Variable declaration ชนิดข้อมูลที่จะใช้คำนวณในที่นี้คือ fluid zones &
    cells
    cell_t c;

    Domain *d = Get_Domain(1); → เรียกตำแหน่งของโดเมน กรณี single-phase flows, domain_id= 1

    /* Loop over all cell threads */
    thread_loop_c(t, d)      → คำนวณให้ครบทุก domains in fluid zones
    {
        /* Loop over all cells */
        begin_c_loop(c, t)   → คำนวณให้ครบทุก cells in domains
        {
            /* The gradient vector of many calculated values can be got */
            C_UDSI (c, t, 1) = -C_UDSI_G (c, t, 0) [0]; /* gradient in x-axis */
            C_UDSI (c, t, 2) = -C_UDSI_G (c, t, 0) [1]; /* gradient in y-axis */
            C_UDSI (c, t, 3) = NV_MAG (C_UDSI_G (c, t, 0)); → คำนวณขนาดของสนามไฟฟ้า
        }
        end_c_loop(c, t)
    }
}
```

ข.2 UDF Macro สำหรับการหาคำตอบสมการควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้าในอากาศจาก

แบบจำลองสายส่ง HVDC ชนิดขั้วเดียว

```
#include "udf.h" → Compiler directive คำสั่งเริ่มต้น UDF เพื่อเรียกใช้ Macros ที่มีอยู่ในโปรแกรม FLUENT
#include "mem.h" → Compiler directive คำสั่งเริ่มต้น UDF เพื่อเรียกใช้พารามิเตอร์ของไหลที่มีอยู่ในโปรแกรม FLUENT

DEFINE_UDS_UNSTEADY(unst1stOrder, c, t, i, apu, su)
{
    /* if the unsteady term is different from the default term: d(rho*phi),
       rho = density of fluid material -----
                                         dt
       this macro is used to specify the appropriate unsteady term */

    real volume, deltaTime= CURRENT_TIMESTEP;
    volume =C_VOLUME(c, t);

    /* the transient term is moved to the RHS of the equation
       and is split into two parts check the FVM algorithm for detail.
       First-order backward differencing is implemented below: */

    *apu = -volume/deltaTime;
    *su = volume*C_UDSI_M1(c, t, i)/deltaTime;
}

DEFINE_EXECUTE_AT_END(electric_field)
{
    Thread* t, t0;
    cell_t c, c0;
    Domain* d = Get_Domain(1);
    real k = 1.5e-4; /* ion mobility at 300K (m^2/V.sec) */
    real Ec = 5.4594e6; /* critical electric field on conductor Ec*/

    /* Loop over all cell threads */
    thread_loop_c(t, d)
    {
        /* Loop over all cells */
        begin_c_loop(c, t)
        {
            /* Previous time-step Potential & Electric field*/
            C_UDMI(c, t, 1) = C_UDSI_M1(c, t, 1);
            C_UDMI(c, t, 2) = C_UDSI_M1(c, t, 2);
            C_UDMI(c, t, 3) = C_UDSI_M1(c, t, 3);
            C_UDMI(c, t, 4) = C_UDSI_M1(c, t, 4);

            /* Electric field factor*/
            C_UDMI(c, t, 5) = (C_UDMI(c, t, 4)-Ec) / (C_UDMI(c, t, 4)+Ec);

            /* Electric field from potential gradient*/
            C_UDSI(c, t, 2) = -C_UDSI_G(c, t, 1)[0];
            C_UDSI(c, t, 3) = -C_UDSI_G(c, t, 1)[1];
            C_UDSI(c, t, 4) = sqrt(C_UDSI(c, t, 2) * C_UDSI(c, t, 2)
                                   + C_UDSI(c, t, 3) * C_UDSI(c, t, 3));

            /* check stability with previous time-step*/
            C_UDMI(c, t, 11) = C_UDSI(c, t, 4) / C_UDMI(c, t, 4);

            /*UDS Flux term for Charge transportation*/
            C_UDMI(c, t, 6) = C_UDSI(c, t, 2) * k; /* gradient flux kEx in x-axis */
            C_UDMI(c, t, 7) = C_UDSI(c, t, 3) * k; /* gradient flux kEy in y-axis */
            C_UDMI(c, t, 8) = C_UDSI(c, t, 4) * k; /* gradient flux magnitude k|E|*/

            /* Charge gradient*/
            C_UDSI(c, t, 6) = C_UDSI_G(c, t, 0)[0];
            C_UDSI(c, t, 7) = C_UDSI_G(c, t, 0)[1];
            C_UDSI(c, t, 8) = sqrt(C_UDSI(c, t, 6) * C_UDSI(c, t, 6)
                                   + C_UDSI(c, t, 7) * C_UDSI(c, t, 7));
        }
    }
}
```

```

/* Current density*/
C_UDMI(c, t, 13) = ( k * C_R(c, t)* C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 2) )
- ( C_UDSI_DIFF(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 6) ); /* Jx_pos */
C_UDMI(c, t, 14) = ( k * C_R(c, t)* C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 3) )
- ( C_UDSI_DIFF(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 7) ); /* Jy_pos */
C_UDSI(c, t, 5) = sqrt( C_UDMI(c, t, 13) * C_UDMI(c, t, 13)
+ C_UDMI(c, t, 14) * C_UDMI(c, t, 14) ); /* J_pos magnitude */
}
end_c_loop(c, t)
}
}

DEFINE_SOURCE(charge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real source; /* source for fluid1 zone*/
    source = C_UDSI(c, t, 0) * C_R(c, t); → กำหนดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของสมการปัวซอง
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 0) = C_UDSI_M1(c, t, 0); /* C_UDMI(c, t, 0) is Previous Charge per mass*/
    C_UDMI(c, t, 9) = source; /*C_UDMI(c, t, 9) is Charge per volume*/
    C_UDMI(c, t, 10) = C_UDSI(c, t, 0); /*For recheck Charge per mass*/
    return source;
}

DEFINE_SOURCE(coronacharge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real source; /* update corona charge source for surface conductor zone*/
    real charge, efactor;
    real x[ND_ND]; /* this holds the position vector */
    real Ec = 5.4594e6; /* critical electric field on conductor Ec*/

    C_UDMI(c, t, 0) = C_UDSI_M1(c, t, 0); /* C_UDMI(c, t, 0) is Previous Charge per mass*/

    if (CURRENT_TIME <= 16e-3)
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        C_UDSI(c, t, 0) = 2.136076794e-6; /* initial charge per mass for UDS-0*/
    }

    else
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        efactor = C_UDMI(c, t, 5); /* electric field factor from DEFINE_EXECUTE_AT_END*/
        charge = C_UDMI(c, t, 0); /* previous time step charge*/
        C_UDSI(c, t, 0) = charge + (efactor*charge); /* update charge per mass for UDS-0*/
    }

    source = C_UDSI(c, t, 0) * C_R(c, t);
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 9) = source; /* C_UDMI(c, t, 9) is Charge per volume */
    return source;
}

DEFINE_UDS_FLUX(charge_flux, f, t, i)
{
    cell_t c0, c1 = -1, c;
    Thread* t0, * t1 = NULL;
    real NV_VEC(psi_vec), NV_VEC(A), flux = 0.0;
    c0 = F_C0(f, t);
    t0 = F_C0_THREAD(f, t);
    F_AREA(A, f, t);
    /* If face lies at domain boundary, use face values; */
    /* If face lies IN the domain, use average of adjacent cells. */

    if (BOUNDARY_FACE_THREAD_P(t)) /*Most face values will be available*/
    {
        real dens;
        /* Depending on its BC, density may not be set on face thread*/
        if (NNULLP(THREAD_STORAGE(t, SV_DENSITY)))
            dens = F_R(f, t); /* Set dens to face value if available */
    }
}

```

```

else
    dens = C_R(c0, t0); /* else, set dens to cell value */

    /* direction & scalar operations */
    NV_DS(psi_vec, =, F_UDMI(f, t, 6), F_UDMI(f, t, 7), 0.0, *, dens);
    flux = NV_DOT(psi_vec, A); /* flux through Face */ → กำหนดฟลักซ์การไหลเท่ากับ  $\rho u \bar{E}$ 
}
else
{
    c1 = F_C1(f, t); /* Get cell on other side of face */
    t1 = F_C1_THREAD(f, t);
    NV_DS(psi_vec, =, C_UDMI(c0, t0, 6), C_UDMI(c0, t0, 7), 0.0, *, C_R(c0, t0));
    NV_DS(psi_vec, +=, C_UDMI(c1, t1, 6), C_UDMI(c1, t1, 7), 0.0, *, C_R(c1, t1));
    flux = NV_DOT(psi_vec, A) / 2.0; /* Average flux through face */
}

return flux;
}

DEFINE_PROFILE(coupled_uds, t, position)
{
    real C1_COORD[ND_ND];
    real C0_COORD[ND_ND];
    real F_COORD[ND_ND];
    real x0[ND_ND], x1[ND_ND], Area[ND_ND], DIFF0, DIFF1, y;
    real Coef0, Coef1;
    real e_x0[ND_ND], e_x1[ND_ND];

    cell_t c0;
    cell_t c1;
    Thread *t0;
    Thread *t1;
    face_t f;

    real A0, A1, dx0, dx1;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        c0 = F_C0(f, t);
        c1 = F_C1(f, t);
        t0 = t->t0;
        t1 = t->t1;
        C_CENTROID(C0_COORD, c0, t0);
        C_CENTROID(C1_COORD, c1, t1);
        F_CENTROID(F_COORD, f, t);
        NV_VV(x0, =, F_COORD, -, C0_COORD);
        dx0 = NV_MAG(x0);
        NV_VV(x1, =, F_COORD, -, C1_COORD);
        dx1 = NV_MAG(x1);
        NV_VS(e_x0, =, x0, /, dx0); /* e_x0 is the unit vector */
        NV_VS(e_x1, =, x1, /, dx1); /* e_x1 is the unit vector */
        F_AREA(Area, f, t);
        Coef0 = (dx0 * NV_MAG(Area)) / NV_DOT(Area, e_x0);
        Coef1 = (dx1 * NV_MAG(Area)) / NV_DOT(Area, e_x1);
        Coef0 = sqrt(Coef0 * Coef0);
        Coef1 = sqrt(Coef1 * Coef1);
        DIFF0 = C_UDSI_DIFF(c0, t0, 0);
        DIFF1 = C_UDSI_DIFF(c1, t1, 0);

        A0 = DIFF0 / Coef0;
        A1 = DIFF1 / Coef1;

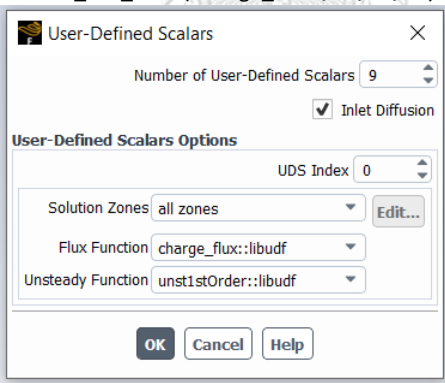
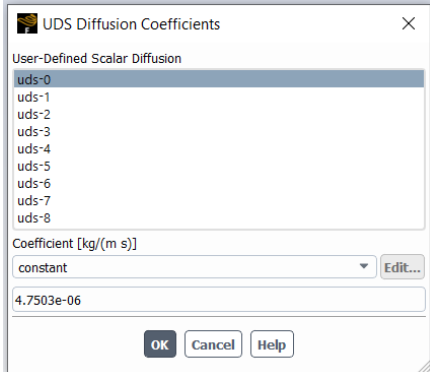
        y = (A0 * C_UDSI(c0, t0, 0) + A1 * C_UDSI(c1, t1, 0)) / (A0 + A1);

        F_PROFILE(f, t, position) = y;
    }
    end_f_loop(f, t)
}

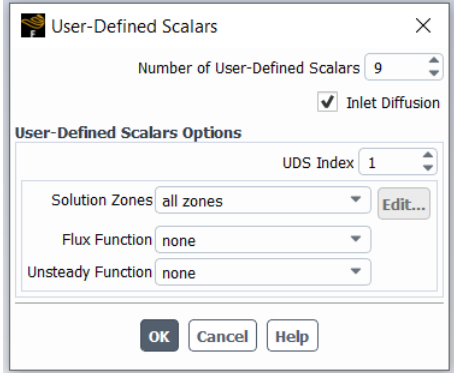
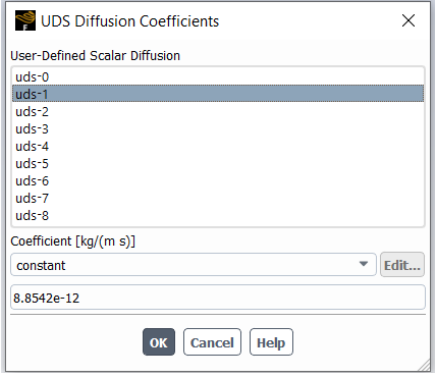
```

ข.3 การตั้งค่าตัวแปรทางไฟฟ้าสำหรับแบบจำลองสายส่ง HVDC แบบชั่วคราวและการทำงาน UDF Macros จากภาคผนวก ข.2

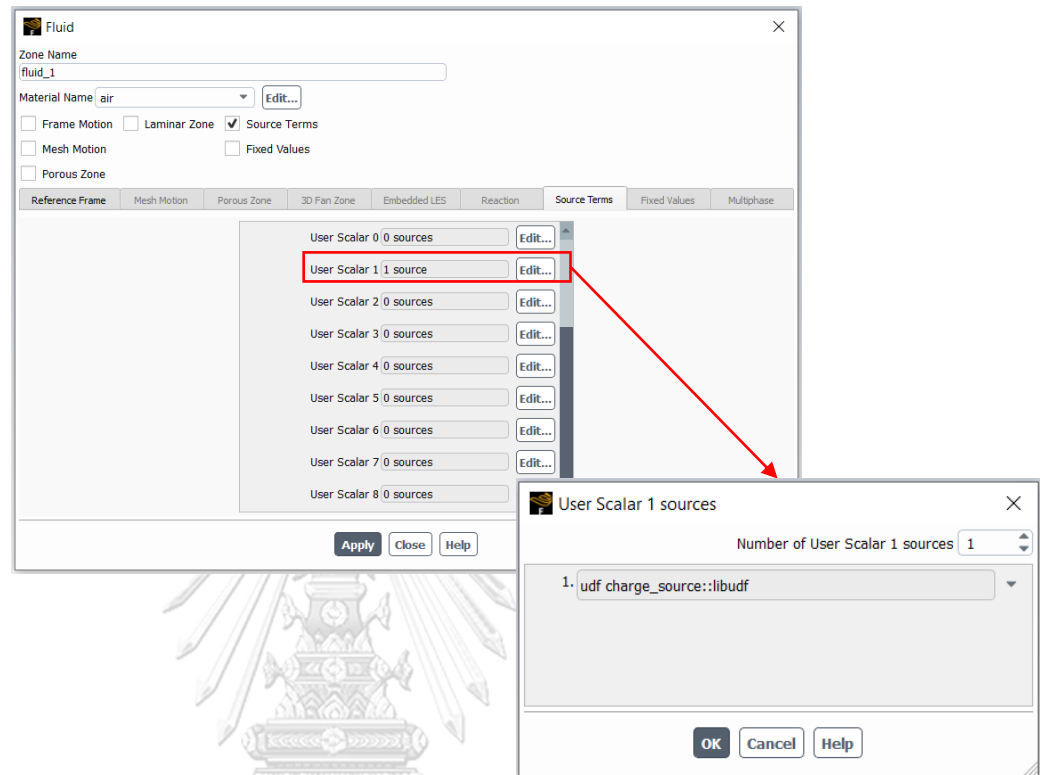
ข.3.1 ความหนาแน่นประจุต่อมวล ρ_Q^* (C/kg)

สมการที่ใช้คำนวณ	<p>การเคลื่อนที่ของประจุตามสมการที่ (3.6) $\frac{\partial \rho_{air} \rho_Q^*}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{air} \mu E \rho_Q^* - D_p \rho_{air} \nabla \rho_Q^*) = 0$</p> <p>เมื่อกำหนด $\mu = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$, $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$,</p> <p>$D_p \rho_{air} = 4.7503 \times 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$</p>
สมการใน FLUENT	<p>สมการ UDS ตามสมการที่ (3.2) โดยเลือกใช้ UDS index $k = 0$</p> <p>สำหรับตัวแปรความหนาแน่นประจุต่อมวล ρ_Q^*</p> <p>สมการที่ (3.2) จึงเขียนใหม่ได้คือ $\frac{\partial \rho \phi_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi_0 - \Gamma_0 \frac{\partial \phi_0}{\partial x_i}) = S_{\phi_0}$</p> <p>เปรียบเทียบกับสมการที่ (3.6) ดังนั้น $\phi_0 = \rho_Q^*$, $\rho u_{i=0} = \rho_{air} \mu E_x$,</p> <p>$\rho u_{i=1} = \rho_{air} \mu E_y$, $\Gamma_0 = D_p \rho_{air}$, $S_{\phi_0} = 0$</p>
การตั้งค่าและใช้งาน UDF Macro	<p>หน้าต่างการตั้งค่าของ UDS index $k = 0$ สำหรับตัวแปรความหนาแน่นประจุต่อมวล ρ_Q^*</p> <ol style="list-style-type: none"> ตั้งค่าให้ประจุเปลี่ยนตามเวลาด้วย UDF Macro <code>DEFINE_UDS_UNSTEADY(unst1stOrder, c, t, i, apu, su)</code> ตั้งค่าประจุให้มีค่าฟลักซ์ไหลผ่านพื้นที่ผิวด้วย UDF Macro <code>DEFINE_UDS_FLUX(charge_flux, f, t, i)</code> ตั้งค่าพจน์การแพร่ของประจุในอากาศด้วย UDS Diffusion Coefficients $D_p \rho_{air} = 4.7503 \times 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$  

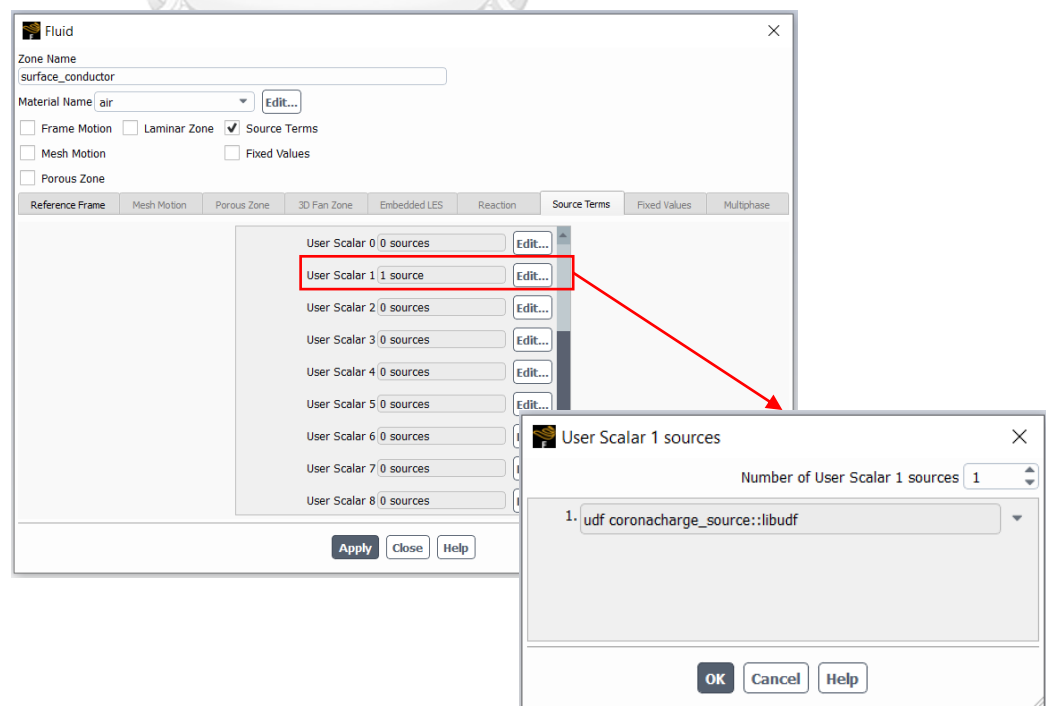
ข.3.2 ศักย์ไฟฟ้า φ (V)

<p>สมการที่ใช้ คำนวณ</p>	<p>สมการปัวซงของตามสมการที่ (3.1) $\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0} \rightarrow -\epsilon_0 \nabla^2 \varphi = \rho_v$ เมื่อกำหนด $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\rho_v = \rho_{air} \rho_Q^*$</p>
<p>สมการใน FLUENT</p>	<p>สมการ UDS ตามสมการที่ (3.2) โดยเลือกใช้ UDS index $k = 1$ สำหรับตัวแปรศักย์ไฟฟ้า φ สมการที่ (3.2) จึงเขียนใหม่ได้คือ $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\Gamma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_1} \rightarrow -\Gamma_1 \left(\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x_i^2} \right) = S_{\phi_1}$ เปรียบเทียบตัวแปรกับสมการที่ (3.1) ดังนั้น $\phi_1 = \varphi$, $\Gamma_1 = \epsilon_0$, $S_{\phi_1} = \rho_v = \rho_{air} \rho_Q^*$</p>
<p>การตั้งค่าและใช้ งาน UDF Macro</p>	<p>หน้าต่างการตั้งค่าของ UDS index $k = 1$ สำหรับตัวแปรศักย์ไฟฟ้า φ</p> <ol style="list-style-type: none"> ตั้งค่าการเปลี่ยนตามเวลาและค่าฟลักซ์ไหลผ่านพื้นที่ผิวเป็น none  <ol style="list-style-type: none"> ตั้งค่าพจน์การแพร่ของศักย์ไฟฟ้าในอากาศด้วย UDS Diffusion Coefficients <p>$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$</p> 

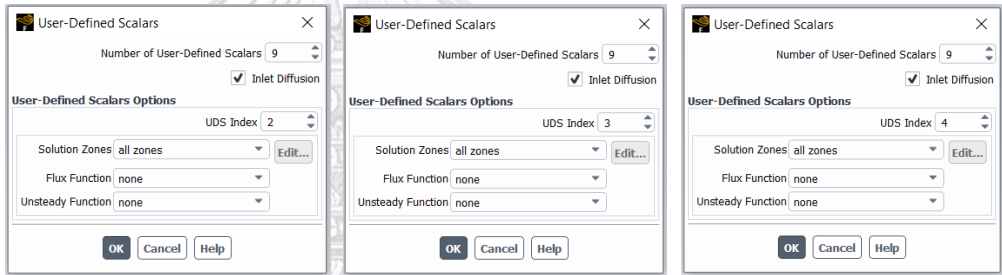
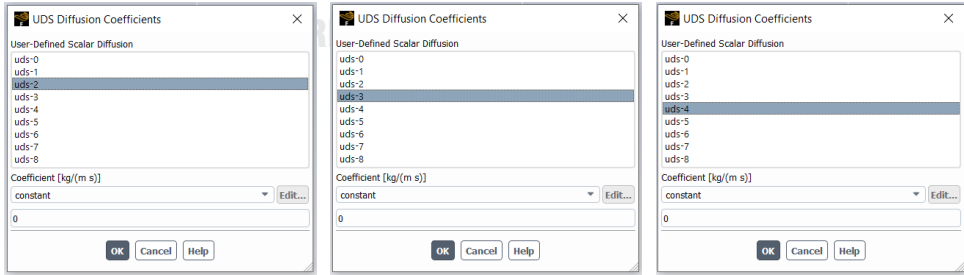
3. ตั้งค่าพจน์แหล่งกำเนิดภายนอก S_{ϕ_1} ให้เป็นความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเชิงปริมาตรด้วย UDF Macro `DEFINE_SOURCE(charge_source, c, t, dS, eqn)` สำหรับบริเวณอากาศ



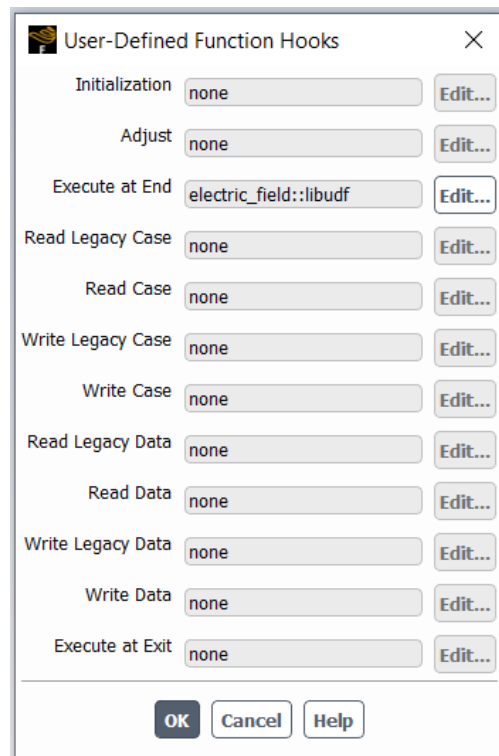
`DEFINE_SOURCE(coronacharge_source, c, t, dS, eqn)` บริเวณไอออนไนเซชันที่ผิวสายตัวนำ



ข.3.3 สนามไฟฟ้า \mathbf{E} (V/m)

สมการที่ใช้คำนวณ	สมการเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าสถิตตามสมการที่ (2.24) $\mathbf{E} = -\nabla\phi$
สมการใน FLUENT	<p>สมการ UDS ตามสมการที่ (3.2) โดยเลือกใช้</p> <p>UDS index $k = 2$ สำหรับตัวแปรเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแกน x (\mathbf{E}_x)</p> <p>UDS index $k = 3$ สำหรับตัวแปรเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแกน y (\mathbf{E}_y)</p> <p>UDS index $k = 4$ สำหรับตัวแปรขนาดสนามไฟฟ้า \mathbf{E}</p> <p>สำหรับตัวแปรสนามไฟฟ้าทั้งหมดไม่ได้ใช้สมการ UDS ตามสมการที่ (3.2) ในการคำนวณ</p> <p>UDS index ที่กำหนดใช้เป็นตัวแปรเพื่อเก็บค่าคำตอบสนามไฟฟ้าแต่ละตัวแปรเท่านั้น</p>
<p>การตั้งค่าและใช้งาน UDF Macro</p>	<p>หน้าต่างการตั้งค่าของ UDS index $k = 2, 3, 4$ สำหรับตัวแปรสนามไฟฟ้า $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}$</p> <ol style="list-style-type: none"> ตั้งค่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและค่าฟลักซ์ไหลผ่านพื้นที่ผิวเป็น none  <ol style="list-style-type: none"> ตั้งค่าพจน์การแพร่ของสนามไฟฟ้าในอากาศด้วย UDS Diffusion Coefficients เป็นศูนย์ 

3. ตั้งค่าการคำนวณสนามไฟฟ้าจากเกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้าตามแนวแกน x และแกน y ด้วย UDF Macro `DEFINE_EXECUTE_AT_END(electric_field)`



หมายเหตุ `DEFINE_EXECUTE_AT_END(electric_field)` ยังมีคำสั่งอื่นๆ เพิ่มเติม ดังนี้

- คำนวณความหนาแน่นกระแสไอออน \mathbf{J}
- คำนวณเกรเดียนต์ของประจุไฟฟ้า $\nabla \rho q^*$
- เก็บค่าตัวแปรศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในชั้นเวลาก่อนหน้า $t - 1$
- เก็บค่าตัวแปรสำหรับปรับประจุไฟฟ้าที่บริเวณไอออนในเซชันที่ผิวสายตัวนำในแต่ละชั้นเวลา
- เก็บค่าตัวแปรสำหรับเส้นฟลักซ์สนามไฟฟ้าที่ทำให้ประจุเคลื่อนที่ $\mu \vec{E}_x$ และ $\mu \vec{E}_y$

ข.4 UDF Macro สำหรับการหาคำตอบสมการควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้าในอากาศจากแบบจำลองสายส่ง HVDC แบบชั่วคราว

การตั้งค่าตัวแปรใช้งานในโปรแกรม FLUENT ด้วยสมการ UDS:

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k}$$

1. สมการปัวซอง (สมการที่ 2.25) $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_{v+} - \rho_{v-}}{\epsilon_0}$ เมื่อ $\rho_{v+} = \rho_{air} \rho_{Q+}^*$ และ $\rho_{v-} = \rho_{air} \rho_{Q-}^*$

→ จัดสมการปัวซองให้อยู่ในรูปศักย์ไฟฟ้า $-\epsilon_0 \nabla^2 \phi = \rho_{v+} - \rho_{v-}$; ϕ คือศักย์ไฟฟ้า (V)

เปรียบเทียบกับสมการ UDS ได้ใหม่คือ $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\Gamma_{21} \frac{\partial \phi_{21}}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_{21}}$

กำหนดให้ $\phi_{21} = \phi$, $\phi_0 = \rho_{Q+}^*$, $\phi_{10} = \rho_{Q-}^*$

ดังนั้น $S_{\phi_{21}} = \rho_{air} \phi_0 - \rho_{air} \phi_{10}$ และ $\Gamma_{21} = \epsilon_0$

```
DEFINE_SOURCE(total_charge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real source; /* total charge source for fluid1 & positive & negative surface zone*/
    if (C_UDSI(c, t, 0) < 0)
    {
        C_UDSI(c, t, 0) = 0; /* reset wrong positive charge */
    }
    if (C_UDSI(c, t, 10) < 0)
    {
        C_UDSI(c, t, 10) = 0; /* reset wrong negative charge */
    }
    C_UDSI(c, t, 20) = C_UDSI(c, t, 0) - C_UDSI(c, t, 10);
    source = C_UDSI(c, t, 20) * C_R(c, t);
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 21) = source; /*C_UDMI(c, t, 21) is Total Charge per volume*/
    return source;
}
```

2. สมการการเคลื่อนที่ประจุบวก (สมการที่ 3.12)

$$\rho_{air} \frac{\partial \rho_{Q+}^*}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_{air} \rho_{Q+}^* (\mu_+ \mathbf{E} + \mathbf{w}) - \rho_{air} D_{\rho+} \nabla^2 \rho_{Q+}^* = -R_{\rho} \frac{(\rho_{air})^2 \rho_{Q+}^* \rho_{Q-}^*}{e}$$

→ เปรียบเทียบกับสมการ UDS ได้ใหม่คือ $\frac{\partial \rho_{air} \phi_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_{air} \phi_0 u_i - \Gamma_0 \frac{\partial \phi_0}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_0}$

กำหนดให้ $\phi_0 = \rho_{Q+}^*$, $\phi_{10} = \rho_{Q-}^*$, $\phi_{24} = |\mathbf{E}|$, $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y \rightarrow \phi_{24} = |\mathbf{a}_x \phi_{22} + \mathbf{a}_y \phi_{23}|$

ดังนั้น $u_{i=0} = \mu_+ \phi_{22} + w_x$, $u_{i=1} = \mu_+ \phi_{23} + w_y$, $\Gamma_0 = \rho_{air} D_{\rho+}$, $S_{\phi_0} = -R_{\rho} \frac{(\rho_{air})^2 \phi_0 \phi_{10}}{e}$

```

DEFINE_EXECUTE_AT_END(wind_positive_electric_field)
{
    Thread* t, t0;
    cell_t c, c0;
    Domain* d = Get_Domain(1);
    real k_pos = 1.4e-4; /* positive ion mobility for 500 kV */
    real Jx_pos, Jy_pos; /*current density xy-component*/

    /* Loop over all cell threads */
    thread_loop_c(t, d)
    {
        /* Loop over all cells */
        begin_c_loop(c, t)
        {
            /*Positive electric field factor from total electric field*/
            C_UDMI(c, t, 5) = C_UDMI(c, t, 25);

            /*UDS Flux term with wind for Positive Charge transportation*/
            C_UDMI(c, t, 7) = C_UDSI(c, t, 22) * k_pos + C_U(c,t); /* wind flux in x-axis */
            C_UDMI(c, t, 8) = C_UDSI(c, t, 23) * k_pos + C_V(c, t); /* wind flux in y-axis */

            /* Positive Charge gradient*/
            C_UDSI(c, t, 7) = C_UDSI_G(c, t, 0)[0];
            C_UDSI(c, t, 8) = C_UDSI_G(c, t, 0)[1];
            C_UDSI(c, t, 9) = sqrt(C_UDSI(c, t, 7)*C_UDSI(c, t, 7)
                                + C_UDSI(c, t, 8)*C_UDSI(c, t, 8));

            /* Positive Current density*/
            Jx_pos = ( k_pos * C_R(c, t)* C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 22))
                    - ( C_UDSI_DIFF(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 7) )
                    + ( C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 0) * C_U(c,t) ) ;

            Jy_pos = ( k_pos * C_R(c, t)* C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 23))
                    - ( C_UDSI_DIFF(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 8) )
                    + ( C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 0) * C_V(c,t) ) ;

            C_UDMI(c, t, 27) = Jx_pos;
            C_UDMI(c, t, 28) = Jy_pos;
        }
        end_c_loop(c, t)
    }
}

DEFINE_UDS_FLUX(positive_charge_flux, f, t, i)
{
    cell_t c0, c1 = -1, c;
    Thread* t0, * t1 = NULL;
    real NV_VEC(psi_vec), NV_VEC(A), flux_pos = 0.0;
    c0 = F_C0(f, t);
    t0 = F_C0_THREAD(f, t);
    F_AREA(A, f, t);
    /* If face lies at domain boundary, use face values; */
    /* If face lies IN the domain, use average of adjacent cells. */
    if (BOUNDARY_FACE_THREAD_P(t)) /*Most face values will be available*/
    {
        real dens;
        /* Depending on its BC, density may not be set on face thread*/
        if (NNULP(THREAD_STORAGE(t, SV_DENSITY)))
            dens = F_R(f, t); /* Set dens to face value if available */
        else
            dens = C_R(c0, t0); /* else, set dens to cell value */

        /* direction & scalar operations */
        NV_DS(psi_vec, =, F_UDMI(f, t, 7), F_UDMI(f, t, 8), 0.0, *, dens); /
        flux_pos = NV_DOT(psi_vec, A); /* positive flux through Face */
    }
    else
    {
        c1 = F_C1(f, t); /* Get cell on other side of face */
        t1 = F_C1_THREAD(f, t);
        NV_DS(psi_vec, =, C_UDMI(c0, t0, 7), C_UDMI(c0, t0, 8), 0.0, *, C_R(c0, t0));
        NV_DS(psi_vec, +=, C_UDMI(c1, t1, 7), C_UDMI(c1, t1, 8), 0.0, *, C_R(c1, t1));
        flux_pos = NV_DOT(psi_vec, A) / 2.0; /* Average positive flux through face */
    }
    /* ANSYS Fluent will multiply the returned value by phi_f
    (the scalar's value at the face) to get the "complete" advective term. */
    return flux_pos;
}

```

```

DEFINE_SOURCE(recombine_charge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real R = 2.2e-12; /* ion recombination coefficient at atmospheric pressure */
    real electron = 1.602e-19; /* electron charge */
    real rec_source; /* recombination source for fluid1 zone*/

    C_UDMI(c, t, 34) = -(R* C_R(c, t)* C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 10))/electron;
    if (C_UDMI(c, t, 34) > 0)
    {
        rec_source = 0;
    }
    else
    {
        rec_source = C_UDMI(c, t, 34);
    }
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 36) = rec_source; /*C_UDMI(c, t, 36) is Recombination Charge*/
    return rec_source;
}

DEFINE_SOURCE(positive_coronacharge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real source_pos; /* update corona charge source for positive surface conductor zone*/
    real charge_pos, efactor_pos;
    real x[ND_ND]; /* this holds the position vector */
    real Ec_pos = 2.7938e6; /* critical electric field on positive conductor Ec*/

    /* C_UDMI(c, t, 20) is Previous Positive Charge per mass*/
    C_UDMI(c, t, 0) = C_UDSI_M1(c, t, 0);

    /* C_UDMI(c, t, 24) is Previous total electric field*/
    C_UDMI(c, t, 24) = C_UDSI_M1(c, t, 0);

    if (CURRENT_TIME <= 32e-3)
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */

        /* initial positive charge per mass of UDS-0 for 500 kV model*/
        C_UDSI(c, t, 0) = 4.6944e-8;
    }
    else
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        efactor_pos = C_UDMI(c, t, 5); /* positive electric field factor */
        charge_pos = C_UDMI(c, t, 0); /* previous time step positive charge*/

        /* update positive charge per mass for UDS-0 */
        C_UDSI(c, t, 0) = charge_pos + (efactor_pos*charge_pos);
    }

    source_pos = C_UDSI(c, t, 0) * C_R(c, t);
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 1) = source_pos; /*C_UDMI(c, t, 1) is Positive Charge per volume*/
    return source_pos;
}

DEFINE_SOURCE(zeroneg_source, c, t, dS, eqn)
{
    real zeroneg; /* set zero negative charge for positive conductor zone*/
    real x[ND_ND]; /* this holds the position vector */

    if (C_UDSI(c, t, 10) > 0 || C_UDSI(c, t, 10) < 0)
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        C_UDSI(c, t, 10) = 0; /* set zero negative charge for UDS-10*/
    }

    zeroneg = C_UDSI(c, t, 10);
    dS[eqn] = 0;
    return zeroneg;
}

```

3. สมการการเคลื่อนที่ประจุลบ (สมการที่ 3.14)

$$\rho_{air} \frac{\partial \rho_{Q-}^*}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_{air} \rho_{Q-}^* (\mu_- \mathbf{E} - \mathbf{w}) - \rho_{air} D_{\rho-} \nabla^2 \rho_{Q-}^* = -R_{\rho} \frac{(\rho_{air})^2 \rho_{Q+}^* \rho_{Q-}^*}{e}$$

→ เปรียบเทียบกับสมการ UDS ได้ใหม่คือ $\frac{\partial \rho_{air} \phi_{10}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{air} \phi_{10} u_i - \Gamma_{10} \frac{\partial \phi_{10}}{\partial x_i}) = S_{\phi_{10}}$

กำหนดให้ $\phi_0 = \rho_{Q+}^*$, $\phi_{10} = \rho_{Q-}^*$,

$$\phi_{24} = |\mathbf{E}|, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y \rightarrow \phi_{24} = |a_x \phi_{22} + a_y \phi_{23}|$$

ดังนั้น $u_{i=0} = -\mu_- \phi_{22} + w_x$, $u_{i=1} = -\mu_- \phi_{23} + w_y$, $\Gamma_{10} = \rho_{air} D_{\rho-}$, $S_{\phi_{10}} = -R_{\rho} \frac{(\rho_{air})^2 \phi_0 \phi_{10}}{e}$

DEFINE_EXECUTE_AT_END(wind_negative_electric_field)

```
{
  Thread* t, t0;
  cell_t c, c0;
  Domain* d = Get_Domain(1);
  real k_neg = 1.8e-4; /* negative ion mobility from paper nomenclature */
  real Jx_neg, Jy_neg; /* current density xy-component */

  /* Loop over all cell threads */
  thread_loop_c(t, d)
  {
    /* Loop over all cells */
    begin_c_loop(c, t)
    {
      /*Negative electric field factor from total electric field*/
      C_UDMI(c, t, 15) = C_UDMI(c, t, 35);

      /*UDS Flux term with wind for Negative Charge transportation*/
      C_UDMI(c, t, 17) = -C_UDSI(c, t, 22) * k_neg + C_U(c,t);/* wind flux in x-axis */
      C_UDMI(c, t, 18) = -C_UDSI(c, t, 23) * k_neg + C_V(c, t);/* wind flux in y-axis */

      /* Negative Charge gradient*/
      C_UDSI(c, t, 17) = C_UDSI_G(c, t, 10)[0];
      C_UDSI(c, t, 18) = C_UDSI_G(c, t, 10)[1];
      C_UDSI(c, t, 19) = sqrt(C_UDSI(c, t, 17) * C_UDSI(c, t, 17)
        + C_UDSI(c, t, 18) * C_UDSI(c, t, 18));

      /* Negative Current density*/
      Jx_neg = ( k_neg * C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 10) * C_UDSI(c, t, 22) )
        + ( C_UDSI_DIFF(c, t, 10) * C_UDSI(c, t, 17) )
        - ( C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 10) * C_U(c,t) );

      Jy_neg = ( k_neg * C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 10) * C_UDSI(c, t, 23) )
        + ( C_UDSI_DIFF(c, t, 10) * C_UDSI(c, t, 18) )
        - ( C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 10) * C_V(c,t) );

      C_UDMI(c, t, 29) = Jx_neg;
      C_UDMI(c, t, 30) = Jy_neg;
    }
    end_c_loop(c, t)
  }
}
```

DEFINE_SOURCE(recombine_charge_source, c, t, dS, eqn)

```
{
  real R = 2.2e-12; /* ion recombination coefficient at atmospheric pressure */
  real electron = 1.602e-19; /* electron charge */
  real rec_source; /* recombination source for fluid1 zone*/

  C_UDMI(c, t, 34) = -(R* C_R(c, t) * C_R(c, t) * C_UDSI(c, t, 0) * C_UDSI(c, t, 10))/electron;
  if (C_UDMI(c, t, 34) > 0)
  {
    rec_source = 0;
  }
  else
  {
    rec_source = C_UDMI(c, t, 34);
  }
}
```

```

    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 36) = rec_source; /*C_UDMI(c, t, 36) is Recombination Charge*/
    return rec_source;
}

DEFINE_UDS_FLUX(negative_charge_flux, f, t, i)
{
    cell_t c0, c1 = -1, c;
    Thread* t0, * t1 = NULL;
    real NV_VEC(psi_vec), NV_VEC(A), flux_neg = 0.0;
    c0 = F_C0(f, t);
    t0 = F_C0_THREAD(f, t);
    F_AREA(A, f, t);
    /* If face lies at domain boundary, use face values; */
    /* If face lies IN the domain, use average of adjacent cells. */
    if (BOUNDARY_FACE_THREAD_P(t)) /*Most face values will be available*/
    {
        real dens;
        /* Depending on its BC, density may not be set on face thread*/
        if (NNULLP(THREAD_STORAGE(t, SV_DENSITY)))
            dens = F_R(f, t); /* Set dens to face value if available */
        else
            dens = C_R(c0, t0); /* else, set dens to cell value */

        /* direction & scalar operations */
        NV_DS(psi_vec, =, F_UDMI(f, t, 17), F_UDMI(f, t, 18), 0.0, *, dens);

        flux_neg = NV_DOT(psi_vec, A); /* negative flux through Face */
    }
    else
    {
        c1 = F_C1(f, t); /* Get cell on other side of face */
        t1 = F_C1_THREAD(f, t);
        NV_DS(psi_vec, =, C_UDMI(c0, t0, 17), C_UDMI(c0, t0, 18), 0.0, *, C_R(c0, t0));
        NV_DS(psi_vec, +=, C_UDMI(c1, t1, 17), C_UDMI(c1, t1, 18), 0.0, *, C_R(c1, t1));
        flux_neg = NV_DOT(psi_vec, A) / 2.0; /* Average negative flux through face */
    }
    /* ANSYS Fluent will multiply the returned value by phi_f
    (the scalar's value at the face) to get the "complete" advective term. */
    return flux_neg;
}

DEFINE_SOURCE(negative_coronacharge_source, c, t, dS, eqn)
{
    real source_neg; /* update corona charge source for negative surface conductor zone*/
    real charge_neg, efactor_neg;
    real x[ND_ND]; /* this holds the position vector */
    real Ec_neg = 2.68328852256986e6; /* critical electric field on negative conductor Ec*/

    /* C_UDMI(c, t, 10) is Previous Negative Charge per mass*/
    C_UDMI(c, t, 10) = C_UDSI_M1(c, t, 10);

    /* C_UDMI(c, t, 24) is Previous total electric field*/
    C_UDMI(c, t, 24) = C_UDSI_M1(c, t, 24);

    if (CURRENT_TIME <= 32e-3)
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */

        /* initial negative charge per mass of UDS-10 for 500 kV model */
        C_UDSI(c, t, 10) = 4.8759e-08;
    }
    else
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        efactor_neg = C_UDMI(c, t, 15); /* negative electric field factor from
DEFINE_EXECUTE_AT_END*/
        charge_neg = C_UDMI(c, t, 10); /* previous time step negative charge*/
        C_UDSI(c, t, 10) = charge_neg + (efactor_neg*charge_neg); /* update negative charge per
mass for UDS-10*/
    }

    source_neg = -C_UDSI(c, t, 10) * C_R(c, t);
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c, t, 11) = source_neg; /*C_UDMI(c, t, 11) is Negative Charge per volume*/
    return source_neg;
}

```

```

DEFINE_SOURCE(zeropos_source, c, t, dS, eqn)
{
    real zeropos; /* set zero positive charge for negative conductor zone*/
    real x[ND_ND]; /* this holds the position vector */

    if (C_UDSI(c, t, 0) > 0 || C_UDSI(c, t, 0) < 0)
    {
        C_CENTROID(x, c, t); /* Get the global coordinates of the cell */
        C_UDSI(c, t, 0) = 0; /* set zero positive charge for UDS-0*/
    }

    zeropos = C_UDSI(c, t, 0);
    dS[eqn] = 0;
    return zeropos;
}

```

4. ผลรวมตัวแปรไฟฟ้า (ρ , \mathbf{E} , \mathbf{J}) ของประจุทั้งสองขั้ว

```

DEFINE_EXECUTE_AT_END(total_bipolar)
{
    Thread* t, t0;
    cell_t c, c0;
    Domain* d = Get_Domain(1);
    real k_pos = 1.4e-4; /* positive ion mobility */
    real k_neg = 1.8e-4; /* negative ion mobility */
    real Ec_pos = 2.79380075099969e6; /* critical electric field on positive conductor Ec*/
    real Ec_neg = 2.68328852256986e6; /* critical electric field on negative conductor Ec*/

    /* Loop over all cell threads */
    thread_loop_c(t, d)
    {
        /* Loop over all cells */
        begin_c_loop(c, t)
        {
            /*Previous time-step for Total Charge density, Potential, Electric field*/
            C_UDMI(c, t, 20) = C_UDSI_M1(c, t, 20);
            C_UDMI(c, t, 22) = C_UDSI_M1(c, t, 22);
            C_UDMI(c, t, 23) = C_UDSI_M1(c, t, 23);
            C_UDMI(c, t, 24) = C_UDSI_M1(c, t, 24);

            /*Electric field factor for positive*/
            C_UDMI(c, t, 25) = (C_UDMI(c, t, 24)-Ec_pos) / (C_UDMI(c, t, 24)+Ec_pos);

            /*Electric field factor for negative*/
            C_UDMI(c, t, 35) = (C_UDMI(c, t, 24)-Ec_neg) / (C_UDMI(c, t, 24)+Ec_neg);

            /* Total Electric field from total potential gradient*/
            C_UDSI(c, t, 22) = -C_UDSI_G(c, t, 21)[0];
            C_UDSI(c, t, 23) = -C_UDSI_G(c, t, 21)[1];
            C_UDSI(c, t, 24) = sqrt(C_UDSI(c, t, 22)*C_UDSI(c, t, 22)
                                   + C_UDSI(c, t, 23)*C_UDSI(c, t, 23));

            /* Check stability with previous time-step*/
            C_UDMI(c, t, 26) = C_UDSI(c, t, 24) / C_UDMI(c, t, 24);

            /* Total Charge gradient*/
            C_UDSI(c, t, 27) = C_UDSI_G(c, t, 20)[0];
            C_UDSI(c, t, 28) = C_UDSI_G(c, t, 20)[1];
            C_UDSI(c, t, 29) = sqrt(C_UDSI(c, t, 27)*C_UDSI(c, t, 27)
                                   + C_UDSI(c, t, 28)*C_UDSI(c, t, 28));

            /* Total Current density*/

            /* sum of x-current density) */
            C_UDMI(c, t, 31) = C_UDMI(c, t, 27) + C_UDMI(c, t, 29);

            /* sum of y-current density) */
            C_UDMI(c, t, 32) = C_UDMI(c, t, 28) + C_UDMI(c, t, 30);

            C_UDSI(c, t, 25) = sqrt(C_UDMI(c, t, 31)*C_UDMI(c, t, 31)
                                   + C_UDMI(c, t, 32)*C_UDMI(c, t, 32));

        }
        end_c_loop(c, t)
    }
}

```


สำหรับการจำลองวิเคราะห์คุณสมบัติหัวข้อ 3.5

```

DEFINE_EXECUTE_AT_END(total_bipolar_temp)
{
  Thread* t, t0;
  cell_t c, c0;
  Domain* d = Get_Domain(1);
  real k_pos = 1.4e-4; /* positive ion mobility from paper appendix */
  real k_neg = 1.8e-4; /* negative ion mobility from paper nomenclature */
  real air_factor, Ec_pos, Ec_neg; /* critical electric field on conductor Ec*/

  /* Loop over all cell threads */
  thread_loop_c(t, d)
  {
    /* Loop over all cells */
    begin_c_loop(c, t)
    {
      /*Corona onset electric field with Peek law */
      air_factor = (273 + 25) / C_T(c, t); /* reference temperature 25C */
      Ec_pos = (0.7 * 33.7 * air_factor * (1 + (0.24/sqrt(air_factor * 1.6955)))) * 1e5;
      Ec_neg = (0.7 * 31.0 * air_factor * (1 + (0.308/sqrt(air_factor * 1.6955)))) * 1e5;
      C_UDMI(c, t, 37) = air_factor;
      C_UDMI(c, t, 38) = Ec_pos;
      C_UDMI(c, t, 39) = Ec_neg;

      /*Previous time-step for Total Charge density, Potential, Electric field*/
      C_UDMI(c, t, 20) = C_UDSI_M1(c, t, 20);
      C_UDMI(c, t, 22) = C_UDSI_M1(c, t, 22);
      C_UDMI(c, t, 23) = C_UDSI_M1(c, t, 23);
      C_UDMI(c, t, 24) = C_UDSI_M1(c, t, 24);

      /*Electric field factor for positive*/
      C_UDMI(c, t, 25) = (C_UDMI(c, t, 24)-Ec_pos) / (C_UDMI(c, t, 24)+Ec_pos);

      /*Electric field factor for negative*/
      C_UDMI(c, t, 35) = (C_UDMI(c, t, 24)-Ec_neg) / (C_UDMI(c, t, 24)+Ec_neg);

      /* Total Electric field from total potential gradient*/
      C_UDSI(c, t, 22) = -C_UDSI_G(c, t, 21)[0];
      C_UDSI(c, t, 23) = -C_UDSI_G(c, t, 21)[1];
      C_UDSI(c, t, 24) = sqrt(C_UDSI(c, t, 22)*C_UDSI(c, t, 22)
        + C_UDSI(c, t, 23) * C_UDSI(c, t, 23));

      /* Check stability with previous time-step*/
      C_UDMI(c, t, 26) = C_UDSI(c, t, 24) / C_UDMI(c, t, 24);

      /* Total Charge gradient*/
      C_UDSI(c, t, 27) = C_UDSI_G(c, t, 20)[0];
      C_UDSI(c, t, 28) = C_UDSI_G(c, t, 20)[1];
      C_UDSI(c, t, 29) = sqrt(C_UDSI(c, t, 27) * C_UDSI(c, t, 27)
        + C_UDSI(c, t, 28) * C_UDSI(c, t, 28));

      /* Total Current density*/

      /* sum of x-current density */
      C_UDMI(c, t, 31) = C_UDMI(c, t, 27) + C_UDMI(c, t, 29);

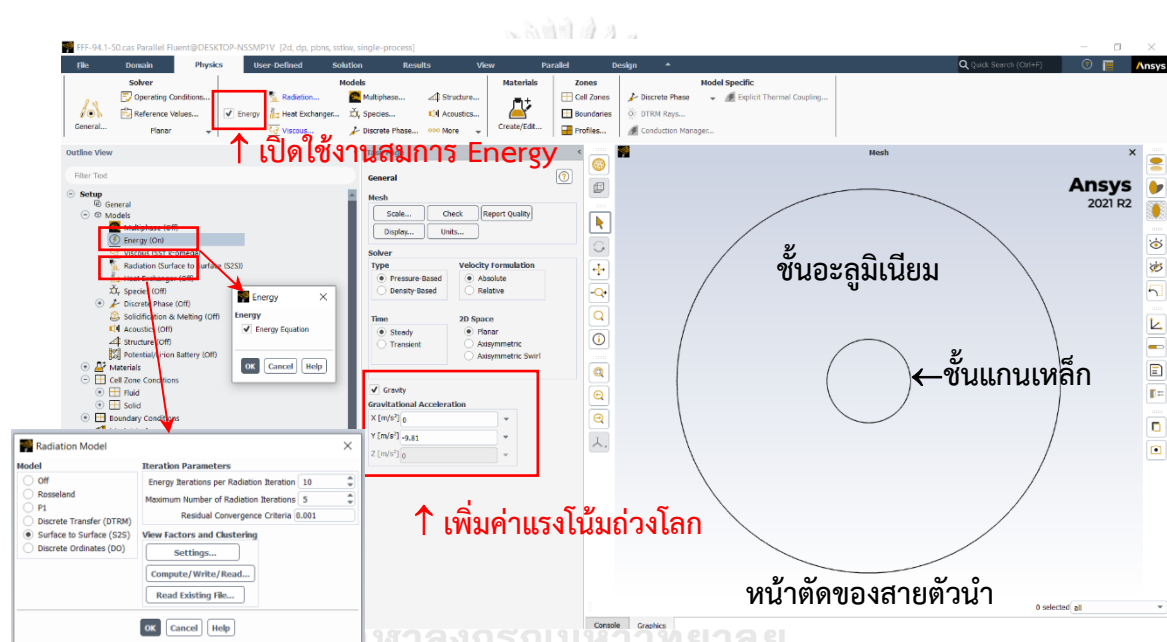
      /* sum of y-current density */
      C_UDMI(c, t, 32) = C_UDMI(c, t, 28) + C_UDMI(c, t, 30);

      C_UDSI(c, t, 25) = sqrt(C_UDMI(c, t, 31) * C_UDMI(c, t, 31)
        + C_UDMI(c, t, 32) * C_UDMI(c, t, 32));
    }
    end_c_loop(c, t)
  }
}

```

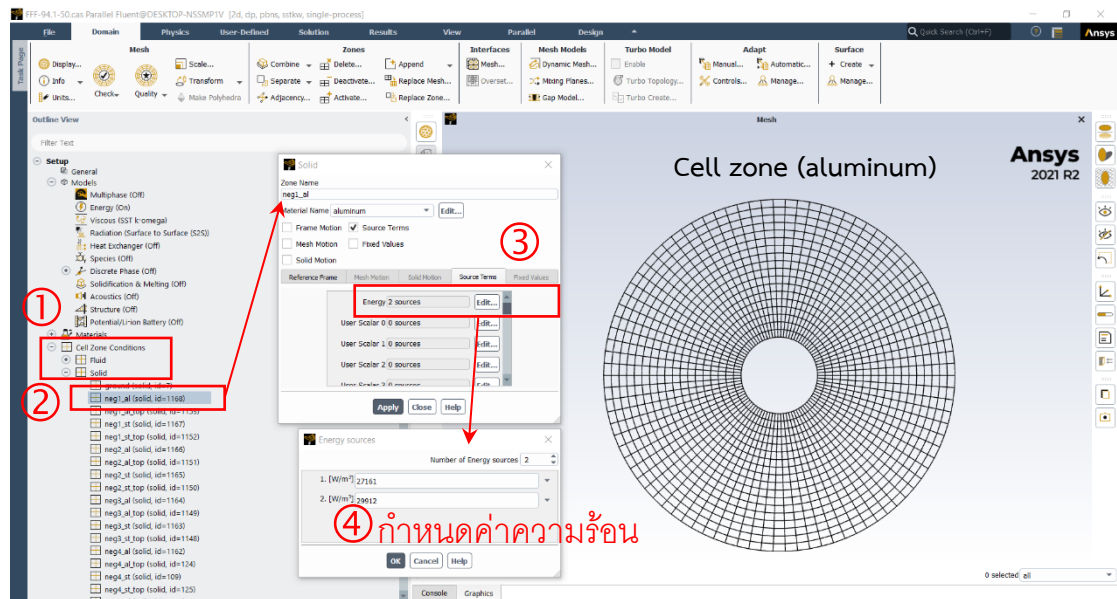
ข.5 การตั้งค่าความร้อนของแบบจำลองสายตัวนำ 1272 MCM

รูปที่ ข.1 แสดงหน้าต่างของแบบจำลองสายตัวนำชั้นแกนเหล็กและอะลูมิเนียมในโปรแกรม ANSYS FLUENT. การตั้งค่าใช้สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation) และเพิ่มตัวแปรอุณหภูมิกำหนดได้โดยเลือกใช้งาน “Energy” บนแถบ Physics ด้านบนหรือ “Models” ทางด้านซ้ายของโปรแกรม. การพาความร้อนออกจากผิวสายตัวนำแบบธรรมชาติและแบบบังคับด้วยการไหลของลม ให้เพิ่มค่าแรงโน้มถ่วงโลกทิศทาง $Y = -9.81 \text{ m/s}^2$. การแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิวสายตัวนำ ให้เลือกใช้งาน “Radiation Models” แบบ Surface to surface ทางด้านซ้ายของโปรแกรม.



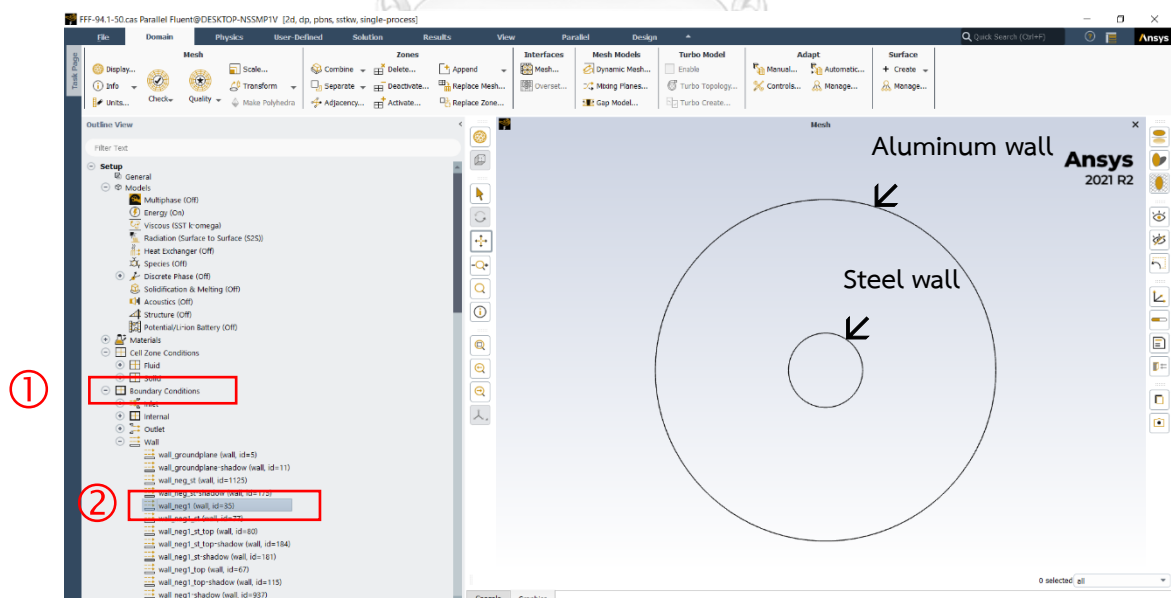
รูปที่ ข.1 หน้าต่างการตั้งค่าความร้อนของแบบจำลองสายตัวนำ

ความร้อนจากกระแสไอออนและความเข้มแสงอาทิตย์ของพื้นที่ชั้นอะลูมิเนียมกำหนดด้วย Source term ของสมการอนุรักษ์พลังงาน. การตั้งค่าเลือกไปที่ Cell zone condition และเลือกเฉพาะพื้นที่ชั้นอะลูมิเนียมให้แสดงหน้าต่างย่อย “Solid” ขึ้นมา. เมื่อกดเลือกแถบ Source term และกดปุ่ม edit จะมีหน้าต่างย่อย “Energy sources” สามารถกำหนดได้ทั้งจำนวนแหล่งพลังงานและระบุตัวเลขค่าความร้อนในหน่วย W/m^3 ได้ดังรูปที่ ข.2.



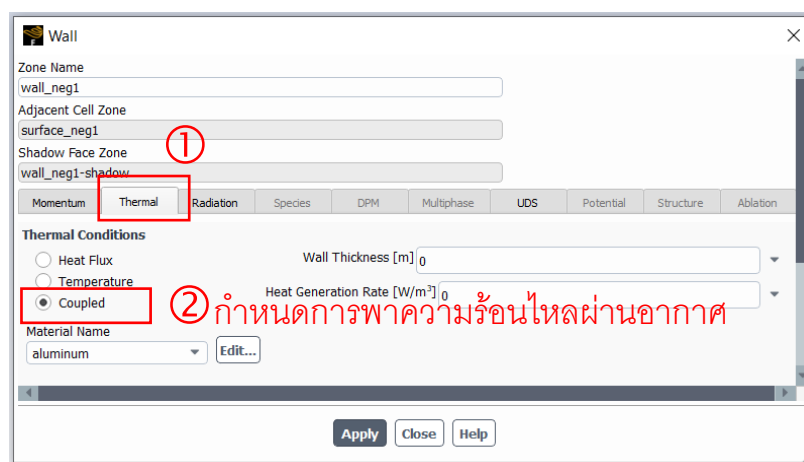
รูปที่ ข.2 หน้าต่างการตั้งค่าความร้อนของพื้นที่ชั้นอะลูมิเนียม

การระบายความร้อนออกจากสายตัวนำด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน สามารถตั้งค่าที่ Boundary conditions ของเส้นขอบเขต Aluminum และ Steel walls ในรูปที่ ข.3.

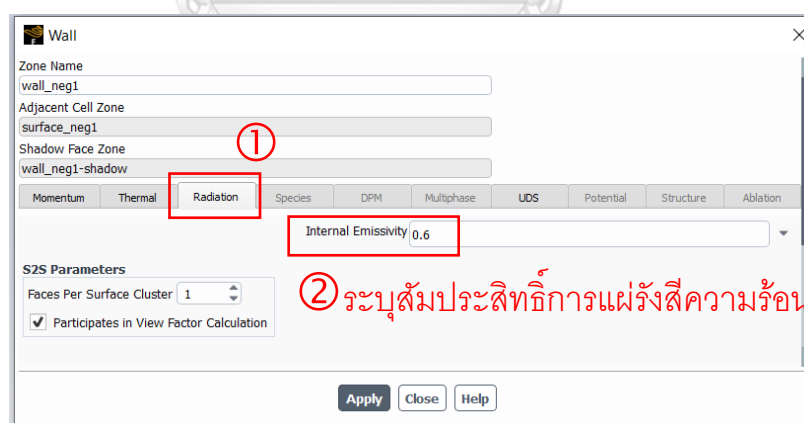


รูปที่ ข.3 หน้าต่างการตั้งค่าเงื่อนไขระบายความร้อนของพื้นผิวสายตัวนำ

เมื่อเลือกเส้นขอบเขตของ Aluminum wall ที่ต้องการตั้งค่า โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างย่อย “Wall” ขึ้นมาดังรูปที่ ข.4. เมื่อกดเลือกแถบ Thermal conditions ให้กำหนดเงื่อนไขเป็น “Coupled”. ในกรณีที่วัสดุเป็นของแข็งและของเหลว โปรแกรมจำลองเป็นรูปแบบการพาความร้อนไหลผ่านอากาศรอบผิวอะลูมิเนียม. เมื่อกดเลือกแถบ Radiation สามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน $\epsilon = 0.6$ ได้ดังรูปที่ ข.5.

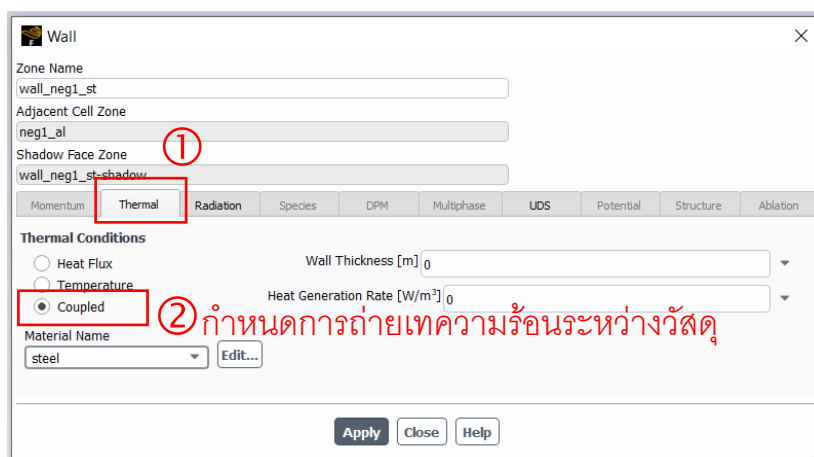


รูปที่ ข.4 การตั้งค่าเงื่อนไขการพาความร้อนของผิวอะลูมิเนียม



รูปที่ ข.5 การตั้งค่าเงื่อนไขการแผ่รังสีความร้อนของผิวอะลูมิเนียม

สำหรับเส้นขอบเขตของ Steel wall ตั้งค่าเฉพาะแถบ Thermal conditions โดยกำหนดเงื่อนไขเป็น “Coupled” ดังรูปที่ ข.6 เช่นเดียวกันกับ Aluminum wall. กรณีที่วัสดุเป็นของแข็งทั้งสองชั้น โปรแกรมจะจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุเป็นรูปแบบการนำความร้อน.



รูปที่ ข.6 การตั้งค่าเงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนของผิวแกนหลัก



ภาคผนวก ค

รายละเอียดผลการวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดิน

ค.1 ผลการวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของสายส่ง HVDC แบบขั้วเดียวชนิดลดขนาด

ตารางภาคผนวก ค1 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กรณีไม่มีสายชิลด์

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 30/3/2565 52.8 %RH, 31.9 °C, 1004.3 hPa		วัดครั้งที่ 2: 19/5/2565 62.7 %RH, 32.3 °C, 1005.5 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.59	0.01	0.63	0.02	0.015	
$P_{0\text{ cm}}$	632	15.79	588	14.69	15.24	12.96
$P_{-30\text{ cm}}$	428	10.69	350	8.74	9.71	8.27
$P_{+30\text{ cm}}$	416	10.39	419	10.46	10.42	8.26
$P_{-60\text{ cm}}$	166	4.13	155	3.87	4.00	3.42
$P_{+60\text{ cm}}$	161	4.00	172	4.28	4.14	3.43

ตารางภาคผนวก ค2 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า *กรณีมีสายชิลด์ 1 เส้น*

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 25 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 18/4/2565 61.8 %RH, 32.4 °C, 1005.4 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 60.2 %RH, 32.3 °C, 1006.6 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.76	0.02	0.62	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	479	11.96	422	10.53	11.24	9.23
$P_{-30\text{ cm}}$	361	9.00	309	7.70	8.35	7.27
$P_{+30\text{ cm}}$	394	9.82	375	9.36	9.59	7.29
$P_{-60\text{ cm}}$	147	3.66	127	3.16	3.41	3.29
$P_{+60\text{ cm}}$	148	3.69	135	3.36	3.53	3.30

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 18/4/2565 52.8 %RH, 31.9 °C, 1004.3 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 61.8 %RH, 32.8 °C, 1003.7 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.62	0.02	0.56	0.01	0.015	
$P_{0\text{ cm}}$	495	12.35	407	10.16	11.25	9.19
$P_{-30\text{ cm}}$	378	9.43	302	7.54	8.48	7.21
$P_{+30\text{ cm}}$	385	9.61	370	9.24	9.42	7.19
$P_{-60\text{ cm}}$	149	3.70	130	3.24	3.47	3.28
$P_{+60\text{ cm}}$	159	3.97	152	3.78	3.87	3.27

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 35 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 18/4/2565 60.7 %RH, 32.4 °C, 1006.5 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 58.8 %RH, 32.6 °C, 1005.3 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.66	0.02	0.70	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	451	11.26	453	11.32	11.29	9.34
$P_{-30\text{ cm}}$	348	8.69	296	7.39	8.04	7.11
$P_{+30\text{ cm}}$	360	8.99	367	9.15	9.07	7.15
$P_{-60\text{ cm}}$	146	3.63	134	3.33	3.48	3.25
$P_{+60\text{ cm}}$	141	3.50	141	3.51	3.51	3.26

ตารางภาคผนวก ค3 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า *กรณีมีสายชิลด์ 2 เส้น*

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 6 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 29/4/2565 56.8 %RH, 32.7 °C, 1005.6 hPa		วัดครั้งที่ 2: 19/5/2565 61.2 %RH, 31.8 °C, 1006.8 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.48	0.01	0.63	0.02	0.015	
$P_{0\text{ cm}}$	375	9.36	320	7.98	8.67	6.67
$P_{-30\text{ cm}}$	345	8.61	281	7.01	7.81	6.25
$P_{+30\text{ cm}}$	347	8.67	341	8.52	8.59	6.23
$P_{-60\text{ cm}}$	155	3.86	130	3.23	3.55	3.13
$P_{+60\text{ cm}}$	145	3.61	146	3.64	3.62	3.13

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 18 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 29/4/2565 54.5 %RH, 33.1 °C, 1004.6 hPa		วัดครั้งที่ 2: 19/5/2565 58.8 %RH, 32.4 °C, 1005.7 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.69	0.02	0.71	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	445	11.10	351	8.76	9.93	7.86
$P_{-30\text{ cm}}$	340	8.47	259	6.45	7.46	6.09
$P_{+30\text{ cm}}$	329	8.21	305	7.61	7.91	6.04
$P_{-60\text{ cm}}$	144	3.59	132	3.28	3.43	3.09
$P_{+60\text{ cm}}$	136	3.38	139	3.45	3.41	3.09

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 26 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 29/4/2565 54.8 %RH, 33.1 °C, 1004.1 hPa		วัดครั้งที่ 2: 19/5/2565 58.8 %RH, 32.7 °C, 1004.9 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.64	0.02	0.77	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	533	13.32	447	11.17	12.24	9.53
$P_{-30\text{ cm}}$	311	7.75	241	6.01	6.88	5.84
$P_{+30\text{ cm}}$	317	7.91	293	7.31	7.61	5.81
$P_{-60\text{ cm}}$	149	3.70	116	2.88	3.29	3.04
$P_{+60\text{ cm}}$	139	3.46	125	3.09	3.27	3.04

ตารางภาคผนวก ค4 ผลการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า *กรณีมีสายชิลด์ 3 เส้น*

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 9 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 21/4/2565 60.9 %RH, 31.6 °C, 1007.1 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 61.7 %RH, 32.7 °C, 1003.1 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.71	0.02	0.66	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	234	5.83	202	5.02	5.43	4.73
$P_{-30\text{ cm}}$	266	6.64	247	6.16	6.40	5.55
$P_{+30\text{ cm}}$	316	7.88	282	7.03	7.45	5.51
$P_{-60\text{ cm}}$	144	3.59	124	3.10	3.34	3.01
$P_{+60\text{ cm}}$	140	3.48	136	3.38	3.43	3.01

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 13 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 21/4/2565 56.6 %RH, 31.9 °C, 1005.9 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 60.3 %RH, 32.8 °C, 1002.8 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.75	0.02	0.64	0.02	0.02	
$P_{0\text{ cm}}$	398	9.93	278	6.92	8.42	6.02
$P_{-30\text{ cm}}$	290	7.24	228	5.69	6.46	5.22
$P_{+30\text{ cm}}$	320	7.98	256	6.38	7.18	5.16
$P_{-60\text{ cm}}$	136	3.39	128	3.19	3.29	2.95
$P_{+60\text{ cm}}$	141	3.51	120	2.99	3.25	2.94

ความสูงสายชิลด์เท่ากับ 28 cm ระยะห่างระหว่างสายชิลด์เท่ากับ 17 cm

จุดวัด	วัดครั้งที่ 1: 21/4/2565 52.8 %RH, 31.9 °C, 1004.3 hPa		วัดครั้งที่ 2: 20/5/2565 61.3 %RH, 32.7 °C, 1003.2 hPa		ค่าเฉลี่ยการวัด J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	ค่าเฉลี่ยการจำลอง J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)
	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	V_{avg} (mV)	J_{avg} ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)		
Background	0.51	0.01	0.63	0.02	0.015	
$P_{0\text{ cm}}$	458	11.43	304	7.59	9.51	6.94
$P_{-30\text{ cm}}$	267	6.66	213	5.30	5.98	4.93
$P_{+30\text{ cm}}$	328	8.19	242	6.03	7.11	4.89
$P_{-60\text{ cm}}$	128	3.19	129	3.21	3.20	2.87
$P_{+60\text{ cm}}$	142	3.53	123	3.05	3.29	2.88

ตารางภาคผนวก ค5 ผลการวัดอุณหภูมิสำหรับกรณีสายตัวนำ 1272 MCM จำนวน 1 เส้น
(อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 29.9°C) ในรูปที่ 5.11

เวลา (นาทีก)	V_{adjust} (V)	I_{CI} (A)	อุณหภูมิสายตัวนำที่แต่ละจุดวัด (°C)			
			1	2	3	4
0	0	0.035	30	30	30	30
10	160	1000	34	35	34	35
20			44	46	43	46
30			50	51	49	52
60			54	58	50	56
120			63	59	54	62
180	180	1150	71	74	64	73
240			73	79	66	75

ภาคผนวก ง
รายละเอียดผลจำลอง

ง.1 ผลจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าของสมการปัวซอง

ตารางภาคผนวก ง.1.1 ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้ในรูปที่ 6.2 ที่ระยะตามรัศมีทรงกลม 1 ถึง 25 mm

① ระยะตาม รัศมีทรงกลม (mm)	② ผลคำนวณศักย์ไฟฟ้า จากโปรแกรมMATLAB (V)	ผลจำลองศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรม ANSYS FLUENT					
		cells size 0.125 mm		cells size 0.05 mm		cells size 0.02 mm	
		③ (V)	④=③/② (%)	⑤ (V)	⑥=⑤/② (%)	⑦ (V)	⑧=⑦/② (%)
1	3.689E-05	3.683E-05	99.84%	3.687E-05	99.94%	3.689E-05	99.98%
2	1.807E-05	1.801E-05	99.66%	1.805E-05	99.89%	1.807E-05	99.97%
3	1.180E-05	1.175E-05	99.57%	1.178E-05	99.88%	1.179E-05	99.97%
4	8.659E-06	8.619E-06	99.53%	8.648E-06	99.88%	8.656E-06	99.97%
5	6.777E-06	6.744E-06	99.51%	6.768E-06	99.88%	6.774E-06	99.97%
6	5.522E-06	5.494E-06	99.50%	5.515E-06	99.87%	5.520E-06	99.97%
7	4.625E-06	4.602E-06	99.49%	4.619E-06	99.87%	4.624E-06	99.97%
8	3.953E-06	3.932E-06	99.48%	3.948E-06	99.87%	3.952E-06	99.97%
9	3.430E-06	3.412E-06	99.47%	3.426E-06	99.87%	3.429E-06	99.97%
10	3.012E-06	2.996E-06	99.46%	3.008E-06	99.87%	3.011E-06	99.97%
11	2.670E-06	2.655E-06	99.45%	2.666E-06	99.86%	2.669E-06	99.97%
12	2.384E-06	2.371E-06	99.45%	2.381E-06	99.86%	2.384E-06	99.97%
13	2.143E-06	2.131E-06	99.44%	2.140E-06	99.86%	2.142E-06	99.96%
14	1.936E-06	1.925E-06	99.43%	1.933E-06	99.86%	1.935E-06	99.96%
15	1.757E-06	1.747E-06	99.42%	1.754E-06	99.85%	1.756E-06	99.96%
16	1.600E-06	1.591E-06	99.41%	1.598E-06	99.85%	1.599E-06	99.96%
17	1.462E-06	1.453E-06	99.40%	1.459E-06	99.85%	1.461E-06	99.96%
18	1.339E-06	1.330E-06	99.38%	1.337E-06	99.85%	1.338E-06	99.96%
19	1.229E-06	1.221E-06	99.37%	1.227E-06	99.84%	1.228E-06	99.96%
20	1.129E-06	1.122E-06	99.36%	1.128E-06	99.84%	1.129E-06	99.96%
21	1.040E-06	1.033E-06	99.34%	1.038E-06	99.84%	1.039E-06	99.96%
22	9.583E-07	9.519E-07	99.33%	9.567E-07	99.83%	9.579E-07	99.96%
23	8.839E-07	8.778E-07	99.31%	8.824E-07	99.83%	8.835E-07	99.96%
24	8.157E-07	8.100E-07	99.30%	8.143E-07	99.82%	8.153E-07	99.96%
25	7.530E-07	7.475E-07	99.28%	7.516E-07	99.82%	7.526E-07	99.95%

ตารางภาคผนวกที่ ง1.2 ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้ในรูปที่ 6.2 ที่ระยะตามรัศมีทรงกลม 25 ถึง 50 mm

① ระยะตาม รัศมีทรงกลม (mm)	② ผลคำนวณศักย์ไฟฟ้า จากโปรแกรม MATLAB (V)	ผลจำลองศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรม ANSYS FLUENT					
		cells size 0.125 mm		cells size 0.05 mm		cells size 0.02 mm	
		③ (V)	④=③/② (%)	⑤ (V)	⑥=⑤/② (%)	⑦ (V)	⑧=⑦/② (%)
26	6.950E-07	6.899E-07	99.26%	6.937E-07	99.81%	6.947E-07	99.95%
27	6.414E-07	6.366E-07	99.25%	6.402E-07	99.81%	6.411E-07	99.95%
28	5.916E-07	5.871E-07	99.23%	5.904E-07	99.80%	5.913E-07	99.95%
29	5.452E-07	5.410E-07	99.22%	5.441E-07	99.80%	5.450E-07	99.95%
30	5.020E-07	4.979E-07	99.20%	5.009E-07	99.79%	5.017E-07	99.95%
31	4.615E-07	4.577E-07	99.18%	4.605E-07	99.78%	4.612E-07	99.95%
32	4.235E-07	4.200E-07	99.15%	4.226E-07	99.77%	4.233E-07	99.94%
33	3.879E-07	3.845E-07	99.13%	3.870E-07	99.76%	3.877E-07	99.94%
34	3.543E-07	3.511E-07	99.10%	3.535E-07	99.75%	3.541E-07	99.94%
35	3.227E-07	3.197E-07	99.06%	3.219E-07	99.74%	3.225E-07	99.93%
36	2.928E-07	2.899E-07	99.02%	2.920E-07	99.72%	2.926E-07	99.93%
37	2.646E-07	2.618E-07	98.97%	2.638E-07	99.71%	2.644E-07	99.93%
38	2.378E-07	2.352E-07	98.92%	2.370E-07	99.69%	2.376E-07	99.92%
39	2.124E-07	2.099E-07	98.85%	2.117E-07	99.67%	2.122E-07	99.92%
40	1.882E-07	1.859E-07	98.77%	1.876E-07	99.64%	1.881E-07	99.91%
41	1.653E-07	1.631E-07	98.67%	1.646E-07	99.61%	1.651E-07	99.90%
42	1.434E-07	1.413E-07	98.54%	1.428E-07	99.57%	1.433E-07	99.89%
43	1.226E-07	1.206E-07	98.38%	1.220E-07	99.52%	1.224E-07	99.88%
44	1.027E-07	1.008E-07	98.17%	1.021E-07	99.45%	1.025E-07	99.86%
45	8.366E-08	8.188E-08	97.86%	8.313E-08	99.36%	8.352E-08	99.83%
46	6.547E-08	6.378E-08	97.41%	6.497E-08	99.22%	6.534E-08	99.80%
47	4.806E-08	4.645E-08	96.65%	4.758E-08	99.00%	4.793E-08	99.73%
48	3.137E-08	2.985E-08	95.13%	3.091E-08	98.54%	3.125E-08	99.61%
49	1.537E-08	1.392E-08	90.57%	1.493E-08	97.16%	1.525E-08	99.23%
50	0	-4.239E-10	-	-3.771E-11	-	1.830E-11	-

ง.2 ผลจำลองหาคำตอบศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของสายตัวนำเหนือพื้นดิน

ตารางภาคผนวก ง.2.1 ศักย์ไฟฟ้าที่จำลองได้ในรูปที่ 6.3(ข)

ความสูงจากระดับพื้นดิน (m)	① วิธีเงาประจุ สมการที่ (2.18) (kV)	ขนาดขอบเขตอากาศ ความกว้าง W × ความสูง H (m ²)											
		30 × 30		45 × 37.5		52.5 × 41.25		90 × 60		120 × 75		150 × 90	
		② (kV)	②/① (%)	③ (kV)	③/① (%)	④ (kV)	④/① (%)	⑤ (kV)	⑤/① (%)	⑥ (kV)	⑥/① (%)	⑦ (kV)	⑦/① (%)
0	0	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
1	1.757	2.566	146%	2.171	124%	2.003	114%	1.871	106%	1.822	104%	1.799	102%
2	3.529	5.144	146%	4.355	123%	4.020	114%	3.757	106%	3.659	104%	3.613	102%
3	5.334	7.743	145%	6.568	123%	6.068	114%	5.674	106%	5.528	104%	5.459	102%
4	7.191	10.379	144%	8.826	123%	8.163	114%	7.642	106%	7.448	104%	7.356	102%
5	9.119	13.066	143%	11.147	122%	10.327	113%	9.680	106%	9.439	104%	9.325	102%
6	11.147	15.824	142%	13.556	122%	12.583	113%	11.815	106%	11.528	103%	11.392	102%
7	13.309	18.682	140%	16.083	121%	14.965	112%	14.080	106%	13.748	103%	13.592	102%
8	15.651	21.675	138%	18.771	120%	17.516	112%	16.520	106%	16.146	103%	15.970	102%
9	18.239	24.860	136%	21.679	119%	20.299	111%	19.201	105%	18.787	103%	18.592	102%
10	21.174	28.319	134%	24.901	118%	23.411	111%	22.221	105%	21.770	103%	21.559	102%
11	24.626	32.196	131%	28.592	116%	27.011	110%	25.744	105%	25.262	103%	25.037	102%
12	28.907	36.756	127%	33.039	114%	31.397	109%	30.072	104%	29.571	102%	29.336	101%
13	34.720	42.596	123%	38.886	112%	37.239	107%	35.906	103%	35.391	102%	35.157	101%
14	44.301	51.634	117%	48.196	109%	46.662	105%	45.408	102%	44.931	101%	44.703	101%
14.985	100	100	100%	100	100%	100	100%	100	100%	100	100%	100	100%

ตารางภาคผนวก ง2.2 ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่จำลองได้ในรูปที่ 6.5

ขนาดขอบเขตอากาศ 150 x 90 (m²)

ความสูงจาก ระดับพื้นดิน (m)	ขนาดศักย์ไฟฟ้า				ขนาดสนามไฟฟ้า			
	① วิธีเงาประจุ สมการที่ (2.18) (kV)	② ผลจำลอง ศักย์ไฟฟ้า (kV)	②-① ผลต่าง ศักย์ไฟฟ้า (kV)	②/① (%)	③ วิธีเงาประจุ สมการที่ (2.19) (kV/m)	④ ผลจำลอง สนามไฟฟ้า (kV/m)	④-③ ผลต่าง สนามไฟฟ้า (kV/m)	④/③ (%)
0	0	0	0	-	1.754	1.796	0.042	102.4%
1	1.757	1.799	0.042	102.4%	1.762	1.804	0.042	102.4%
2	3.529	3.613	0.083	102.4%	1.786	1.827	0.041	102.3%
3	5.334	5.459	0.125	102.3%	1.827	1.868	0.041	102.2%
4	7.191	7.356	0.166	102.3%	1.888	1.929	0.040	102.1%
5	9.119	9.325	0.206	102.3%	1.973	2.013	0.040	102.0%
6	11.147	11.392	0.245	102.2%	2.088	2.127	0.039	101.8%
7	13.309	13.592	0.283	102.1%	2.243	2.280	0.037	101.7%
8	15.651	15.970	0.319	102.0%	2.451	2.487	0.035	101.4%
9	18.239	18.592	0.353	101.9%	2.741	2.774	0.033	101.2%
10	21.174	21.559	0.384	101.8%	3.158	3.186	0.029	100.9%
11	24.626	25.037	0.411	101.7%	3.795	3.818	0.023	100.6%
12	28.907	29.336	0.429	101.5%	4.873	4.886	0.013	100.3%
13	34.720	35.157	0.436	101.3%	7.048	7.073	0.025	100.4%
14	44.301	44.703	0.402	100.9%	13.610	13.533	-0.077	99.4%
14.985	100	100	0.000	100.0%	877.966	855.980	-21.986	97.5%

ง.3 ผลจำลองสายส่ง HVDC แบบชั่วเดียว

ตารางภาคผนวก ง.3.1 ความหนาแน่นของไอออนที่ตำแหน่งใต้สายตัวนำในรูปที่ 6.6

เวลาจำลอง (s)	จุด G _p ที่ความสูงระดับพื้นดิน (C/m ³)				จุด G _{0.5} ที่ความสูง 0.5 cm จากระดับพื้นดิน (C/m ³)			
	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$	$D_g = 10^3 D_p$
0.0100	1.29E-15	3.86E-16	1.10E-16	2.24E-17	1.13E-15	1.13E-15	1.13E-15	1.13E-15
0.0125	3.15E-13	9.56E-14	2.74E-14	5.71E-15	1.20E-13	1.20E-13	1.20E-13	1.20E-13
0.0150	1.58E-11	4.82E-12	1.38E-12	2.94E-13	1.55E-11	1.55E-11	1.55E-11	1.55E-11
0.0175	2.85E-10	8.74E-11	2.52E-11	5.43E-12	4.50E-10	4.50E-10	4.50E-10	4.50E-10
0.0200	2.65E-09	8.15E-10	2.35E-10	5.14E-11	4.98E-09	4.98E-09	4.98E-09	4.98E-09
0.0225	1.64E-08	5.05E-09	1.46E-09	3.25E-10	2.96E-08	2.96E-08	2.96E-08	2.96E-08
0.0250	6.69E-08	2.06E-08	6.00E-09	1.35E-09	1.15E-07	1.15E-07	1.15E-07	1.15E-07
0.0275	1.93E-07	5.98E-08	1.74E-08	3.97E-09	2.89E-07	2.89E-07	2.89E-07	2.89E-07
0.0300	4.31E-07	1.34E-07	3.90E-08	8.98E-09	5.21E-07	5.21E-07	5.21E-07	5.21E-07
0.0325	7.99E-07	2.48E-07	7.23E-08	1.68E-08	7.41E-07	7.41E-07	7.41E-07	7.41E-07
0.0350	1.30E-06	4.03E-07	1.18E-07	2.75E-08	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07
0.0375	1.91E-06	5.94E-07	1.73E-07	4.07E-08	9.98E-07	9.98E-07	9.98E-07	9.98E-07
0.0400	2.61E-06	8.12E-07	2.37E-07	5.59E-08	1.03E-06	1.03E-06	1.03E-06	1.03E-06
0.0425	3.37E-06	1.05E-06	3.06E-07	7.24E-08	1.02E-06	1.02E-06	1.02E-06	1.02E-06
0.0450	4.16E-06	1.30E-06	3.79E-07	8.97E-08	9.77E-07	9.77E-07	9.77E-07	9.77E-07
0.0475	4.99E-06	1.56E-06	4.54E-07	1.08E-07	9.37E-07	9.37E-07	9.37E-07	9.37E-07
0.0500	5.84E-06	1.82E-06	5.32E-07	1.26E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07
0.0550	7.60E-06	2.37E-06	6.92E-07	1.64E-07	8.97E-07	8.97E-07	8.97E-07	8.97E-07
0.0600	9.46E-06	2.95E-06	8.61E-07	2.03E-07	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07
0.0650	1.14E-05	3.56E-06	1.04E-06	2.44E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07
0.0700	1.34E-05	4.18E-06	1.22E-06	2.85E-07	9.05E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07
0.0750	1.55E-05	4.82E-06	1.40E-06	3.27E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07
0.0800	1.76E-05	5.47E-06	1.59E-06	3.69E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07
0.0850	1.97E-05	6.14E-06	1.77E-06	4.11E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.0900	2.18E-05	6.81E-06	1.96E-06	4.53E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.0950	2.40E-05	7.48E-06	2.16E-06	4.95E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.1000	2.62E-05	8.16E-06	2.35E-06	5.37E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.1050	2.84E-05	8.85E-06	2.54E-06	5.78E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.1100	3.07E-05	9.53E-06	2.73E-06	6.18E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.1150	3.29E-05	1.02E-05	2.92E-06	6.59E-07	9.08E-07	9.09E-07	9.09E-07	9.09E-07
0.1200	3.51E-05	1.09E-05	3.11E-06	6.98E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07
0.1250	3.73E-05	1.16E-05	3.29E-06	7.37E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07	9.08E-07
0.1300	3.95E-05	1.23E-05	3.48E-06	7.75E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07
0.1350	4.17E-05	1.29E-05	3.66E-06	8.13E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07	9.07E-07
0.1400	4.39E-05	1.36E-05	3.85E-06	8.50E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07
0.1450	4.60E-05	1.43E-05	4.03E-06	8.86E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07	9.06E-07
0.1500	4.82E-05	1.49E-05	4.20E-06	9.21E-07	9.05E-07	9.05E-07	9.05E-07	9.05E-07
0.1550	5.03E-05	1.56E-05	4.38E-06	9.56E-07	9.05E-07	9.05E-07	9.05E-07	9.05E-07
0.1600	5.25E-05	1.62E-05	4.55E-06	9.90E-07	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07
0.1650	5.46E-05	1.69E-05	4.72E-06	1.02E-06	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07
0.1700	5.66E-05	1.75E-05	4.89E-06	1.06E-06	9.03E-07	9.04E-07	9.04E-07	9.04E-07
0.1750	5.87E-05	1.81E-05	5.05E-06	1.09E-06	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07
0.1800	6.08E-05	1.88E-05	5.22E-06	1.12E-06	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07	9.03E-07
0.1850	6.28E-05	1.94E-05	5.38E-06	1.15E-06	9.02E-07	9.02E-07	9.02E-07	9.02E-07
0.1900	6.48E-05	2.00E-05	5.53E-06	1.18E-06	9.02E-07	9.02E-07	9.02E-07	9.02E-07
0.1950	6.68E-05	2.06E-05	5.69E-06	1.21E-06	9.01E-07	9.02E-07	9.02E-07	9.02E-07
0.2000	6.87E-05	2.12E-05	5.84E-06	1.24E-06	9.01E-07	9.01E-07	9.01E-07	9.01E-07

ตารางภาคผนวก ง3.2 ความหนาแน่นกระแสของไอออนที่ความสูงไถ่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.7

ความสูงจาก ระดับพื้นดิน (cm)	$J_{drift} (\mu A/m^2)$				$J_{diffuse} (\mu A/m^2)$			
	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$	$D_g = 10^3 D_\rho$
3.0	13.23	13.23	13.23	13.23	9.94E-06	9.82E-06	9.78E-06	9.77E-06
2.9	13.24	13.24	13.24	13.24	1.06E-05	1.05E-05	1.04E-05	1.04E-05
2.8	13.24	13.24	13.24	13.24	1.13E-05	1.11E-05	1.11E-05	1.11E-05
2.7	13.24	13.24	13.24	13.24	1.20E-05	1.18E-05	1.17E-05	1.17E-05
2.6	13.24	13.25	13.25	13.25	1.26E-05	1.25E-05	1.24E-05	1.24E-05
2.5	13.25	13.25	13.25	13.25	1.33E-05	1.31E-05	1.31E-05	1.30E-05
2.4	13.25	13.25	13.25	13.25	1.40E-05	1.38E-05	1.37E-05	1.37E-05
2.3	13.25	13.25	13.25	13.25	1.47E-05	1.44E-05	1.44E-05	1.43E-05
2.2	13.26	13.26	13.26	13.26	1.53E-05	1.51E-05	1.50E-05	1.50E-05
2.1	13.26	13.26	13.26	13.26	1.60E-05	1.58E-05	1.57E-05	1.57E-05
2.0	13.26	13.26	13.26	13.26	1.67E-05	1.64E-05	1.63E-05	1.63E-05
1.9	13.26	13.26	13.26	13.26	1.74E-05	1.71E-05	1.70E-05	1.70E-05
1.8	13.27	13.27	13.27	13.27	1.80E-05	1.77E-05	1.77E-05	1.76E-05
1.7	13.32	13.32	13.32	13.32	0.01	0.01	0.01	0.01
1.6	13.37	13.37	13.37	13.37	0.02	0.02	0.02	0.02
1.5	13.42	13.42	13.42	13.42	0.04	0.04	0.04	0.04
1.4	13.47	13.47	13.47	13.47	0.05	0.05	0.05	0.05
1.3	13.52	13.52	13.52	13.52	0.06	0.06	0.06	0.06
1.2	13.57	13.57	13.57	13.57	0.07	0.07	0.07	0.07
1.1	13.63	13.62	13.62	13.62	0.08	0.08	0.08	0.08
1.0	13.68	13.67	13.67	13.67	0.10	0.10	0.09	0.09
0.9	13.73	13.72	13.72	13.72	0.11	0.11	0.11	0.11
0.8	13.78	13.77	13.77	13.77	0.12	0.12	0.12	0.12
0.7	13.28	13.28	13.28	13.28	0.49	0.49	0.49	0.49
0.6	12.78	12.79	12.79	12.79	0.86	0.86	0.85	0.85
0.5	12.30	12.31	12.31	12.32	1.23	1.22	1.22	1.22
0.4	11.82	11.84	11.85	11.85	1.61	1.59	1.59	1.59
0.3	11.35	11.38	11.38	11.39	1.98	1.96	1.96	1.95
0.2	8,695	8,521	8,465	8,448	2.84	2.88	2.90	2.90
0.1	22,310	21,800	21,637	21,587	3.71	3.81	3.84	3.85
0.0	2,015	616	169	5.77	4.22	4.37	4.42	4.44

ตารางภาคผนวก ง3.3.1 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.9 ช่วงระยะ $x = -200$ ถึง 0 cm

x (cm)	กรณีไม่มีสายชีลด์		กรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น					
			$H_{shield} = 35$ cm		$H_{shield} = 28$ cm		$H_{shield} = 25$ cm	
	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)
-200.0	0	11.41	0	11.39	0	11.38	0	11.38
-190.0	0	12.32	0	12.29	0	12.28	0	12.28
-180.0	0	13.38	0	13.34	0	13.33	0	13.33
-170.0	0	14.62	0	14.57	0	14.55	0	14.56
-160.0	0	16.08	0	16.01	0	16.00	0	16.01
-150.0	0	17.82	0	17.72	0	17.72	0	17.73
-140.0	0	19.92	0	19.77	0	19.78	0	19.80
-130.0	0	22.46	0	22.26	0	22.27	0	22.30
-120.0	0	25.61	0	25.32	0	25.34	0	25.38
-110.0	0	29.58	0	29.16	0	29.21	0	29.26
-100.0	0.32	34.78	0.23	34.15	0.24	34.24	0.26	34.32
-95.0	0.97	37.76	0.83	37.06	0.85	37.16	0.87	37.24
-90.0	1.60	40.70	1.49	39.94	1.51	40.05	1.52	40.14
-85.0	1.97	43.51	1.91	42.68	1.92	42.80	1.92	42.89
-80.0	2.18	46.25	2.15	45.31	2.15	45.45	2.15	45.55
-75.0	2.35	49.05	2.33	47.92	2.33	48.10	2.33	48.21
-70.0	2.59	51.97	2.54	50.58	2.54	50.81	2.55	50.94
-65.0	2.92	55.08	2.82	53.34	3.21	56.56	2.84	53.78
-60.0	3.35	58.36	3.18	56.20	3.69	59.57	3.70	59.79
-55.0	3.88	61.84	3.64	59.13	4.27	62.62	4.28	62.88
-50.0	4.53	65.48	4.20	62.10	4.60	64.13	4.60	64.42
-47.5	4.90	67.35	4.51	63.57	4.94	65.62	4.94	65.94
-45.0	5.30	69.25	4.84	65.03	5.30	67.07	5.31	67.41
-42.5	5.72	71.17	5.19	66.45	5.68	68.46	5.70	68.84
-40.0	6.18	73.10	5.56	67.83	6.07	69.78	6.10	70.19
-37.5	6.65	75.03	5.93	69.14	6.47	71.00	6.50	71.44
-35.0	7.16	76.95	6.31	70.39	6.86	72.10	6.88	72.57
-32.5	7.69	78.85	6.71	71.54	7.25	73.07	7.28	73.56
-30.0	8.24	80.72	7.12	72.59	7.62	73.87	7.67	74.36
-27.5	8.80	82.53	7.53	73.52	7.97	74.50	8.07	74.97
-25.0	9.36	84.27	7.92	74.31	8.31	74.92	8.46	75.35
-22.5	9.93	85.93	8.27	74.96	8.63	75.14	8.74	75.49
-20.0	10.49	87.49	8.62	75.47	8.95	75.15	9.07	75.36
-17.5	11.03	88.92	9.00	75.82	9.16	74.97	9.37	75.00
-15.0	11.53	90.22	9.32	76.04	9.31	74.61	9.496	74.41
-12.5	12.00	91.35	9.55	76.12	9.42	74.15	9.47	73.68
-10.0	12.42	92.30	9.61	76.10	9.46	73.65	9.42	72.90
-7.5	12.76	93.06	9.55	76.00	9.40	73.18	9.40	72.19
-5.0	13.02	93.62	9.52	75.88	8.99	72.84	9.09	71.69
-2.5	13.19	93.96	9.22	75.77	8.35	72.71	8.46	71.50
0	13.23	94.07	8.50	75.71	8.98	72.85	9.08	71.68

ตารางภาคผนวก ง3.3.2 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.9 ช่วงระยะ $x = 2.5$ ถึง 200 cm

x (cm)	กรณีไม่มีสายชีลด์		กรณีมีสายชีลด์ 1 เส้น					
			$H_{shield} = 35$ cm		$H_{shield} = 28$ cm		$H_{shield} = 25$ cm	
	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)
2.5	13.21	93.96	9.15	75.75	9.38	73.19	9.39	72.17
5.0	13.04	93.62	9.49	75.84	9.44	73.67	9.480	72.86
7.5	12.77	93.06	9.592	75.95	9.51	74.18	9.40	73.62
10.0	12.42	92.30	9.51	76.03	9.44	74.65	9.27	74.34
12.5	11.99	91.34	9.31	76.04	9.24	75.00	9.17	74.93
15.0	11.52	90.21	9.11	75.96	8.97	75.17	9.00	75.30
17.5	11.00	88.91	8.89	75.76	8.67	75.15	8.67	75.44
20.0	10.46	87.48	8.56	75.43	8.32	74.92	8.41	75.32
22.5	9.91	85.92	8.27	74.95	7.95	74.48	8.06	74.97
25.0	9.35	84.27	7.94	74.33	7.60	73.84	7.70	74.38
27.5	8.78	82.52	7.56	73.55	7.23	73.03	7.33	73.59
30.0	8.22	80.71	7.17	72.64	6.82	72.05	6.94	72.62
32.5	7.68	78.85	6.78	71.61	6.41	70.94	6.53	71.50
35.0	7.15	76.96	6.37	70.47	6.02	69.71	6.13	70.25
37.5	6.66	75.04	5.98	69.23	5.63	68.40	5.73	68.90
40.0	6.18	73.11	5.60	67.91	5.26	67.00	5.35	67.48
42.5	5.73	71.19	5.23	66.54	4.91	65.56	4.98	66.00
45.0	5.31	69.27	4.88	65.11	4.57	64.08	4.63	64.48
47.5	4.91	67.38	4.54	63.66	4.26	62.57	4.30	62.94
50.0	4.54	65.51	4.23	62.18	3.69	59.53	3.72	59.84
55.0	3.90	61.87	3.66	59.20	3.21	56.53	3.23	56.78
60.0	3.36	58.39	3.20	56.26	2.83	53.61	2.85	53.82
60.5	3.31	58.06	2.83	53.39	2.54	50.79	2.55	50.96
65.0	2.93	55.10	2.55	50.63	2.33	48.09	2.33	48.22
70.0	2.60	52.00	2.34	47.95	2.15	45.44	2.15	45.56
75.0	2.36	49.07	2.15	45.34	1.92	42.80	1.93	42.90
80.0	2.18	46.27	1.91	42.70	1.51	40.05	1.52	40.14
85.0	1.97	43.52	1.49	39.96	0.85	37.16	0.88	37.25
90.0	1.61	40.71	0.83	37.08	0.24	34.24	0.26	34.32
95.0	0.99	37.78	0.23	34.17	0	29.21	0	29.26
100.0	0.33	34.79	0	29.17	0	25.35	0	25.38
110.0	0	29.59	0	25.33	0	22.28	0	22.30
120.0	0	25.61	0	22.27	0	19.78	0	19.79
130.0	0	22.46	0	19.78	0	17.72	0	17.73
140.0	0	19.91	0	17.73	0	16.00	0	16.01
150.0	0	17.82	0	16.01	0	14.56	0	14.56
160.0	0	16.08	0	14.57	0	13.33	0	13.33
170.0	0	14.61	0	13.34	0	12.28	0	12.28
180.0	0	13.37	0	12.30	0	11.38	0	11.38
190.0	0	12.31	0	11.39	0	11.38	0	11.38
200.0	0	11.40	0	11.39	0	12.28	0	12.28

ตารางภาคผนวก ง3.4.1 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ช่วงระยะ $x = -200$ ถึง 0 cm

x (cm)	กรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น						กรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น					
	$S_{shield} = 6$ cm		$S_{shield} = 18$ cm		$S_{shield} = 26$ cm		$S_{shield} = 9$ cm		$S_{shield} = 13$ cm		$S_{shield} = 17$ cm	
	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)	E_g (kV/m)
-200.0	0	11.33	0	11.32	0	11.29	0	11.29	0	11.26	0	11.23
-190.0	0	12.23	0	12.21	0	12.18	0	12.18	0	12.15	0	12.11
-180.0	0	13.26	0	13.25	0	13.21	0	13.21	0	13.17	0	13.12
-170.0	0	14.48	0	14.46	0	14.41	0	14.41	0	14.37	0	14.31
-160.0	0	15.91	0	15.88	0	15.83	0	15.82	0	15.77	0	15.71
-150.0	0	17.60	0	17.56	0	17.50	0	17.50	0	17.43	0	17.35
-140.0	0	19.62	0	19.58	0	19.51	0	19.49	0	19.41	0	19.32
-130.0	0	22.07	0	22.02	0	21.93	0	21.90	0	21.80	0	21.68
-120.0	0	25.07	0	25.01	0	24.89	0	24.85	0	24.72	0	24.57
-110.0	0	28.83	0	28.74	0	28.58	0	28.53	0	28.35	0	28.15
-100.0	0.19	33.70	0.18	33.58	0.16	33.36	0.14	33.27	0.13	33.02	0.11	32.74
-95.0	0.74	36.55	0.72	36.41	0.68	36.17	0.65	36.06	0.60	35.78	0.55	35.45
-90.0	1.41	39.40	1.39	39.24	1.35	38.98	1.32	38.87	1.28	38.57	1.22	38.21
-85.0	1.85	42.09	1.84	41.92	1.81	41.64	1.80	41.52	1.77	41.19	1.73	40.81
-80.0	2.11	44.65	2.09	44.46	2.07	44.15	2.07	44.01	2.04	43.65	2.01	43.22
-75.0	2.29	47.16	2.28	46.94	2.25	46.58	2.25	46.42	2.23	45.99	2.20	45.51
-70.0	2.48	49.69	2.47	49.43	2.44	49.00	2.44	48.80	2.41	48.29	2.37	47.72
-65.0	2.74	52.26	2.72	51.94	2.68	51.44	2.67	51.18	2.63	50.57	2.58	49.88
-60.0	3.08	54.87	3.04	54.48	2.99	53.87	2.97	53.55	2.91	52.79	2.84	51.96
-55.0	3.49	57.47	3.44	57.00	3.38	56.25	3.34	55.84	3.25	54.91	3.15	53.90
-50.0	3.99	60.00	3.92	59.42	3.84	58.50	3.77	57.98	3.65	56.82	3.51	55.59
-47.5	4.26	61.20	4.18	60.56	4.08	59.54	4.01	58.94	3.87	57.65	3.72	56.31
-45.0	4.54	62.34	4.46	61.63	4.33	60.51	4.26	59.82	4.09	58.39	3.93	56.92
-42.5	4.83	63.40	4.74	62.61	4.59	61.38	4.51	60.57	4.31	58.99	4.12	57.40
-40.0	5.13	64.35	5.03	63.48	4.85	62.14	4.75	61.19	4.53	59.46	4.30	57.74
-37.5	5.44	65.18	5.32	64.22	5.11	62.77	4.99	61.64	4.75	59.74	4.51	57.92
-35.0	5.75	65.86	5.60	64.82	5.37	63.27	5.23	61.90	4.95	59.85	4.71	57.95
-32.5	6.02	66.35	5.87	65.24	5.62	63.63	5.45	61.93	5.15	59.74	4.89	57.81
-30.0	6.30	66.66	6.14	65.47	5.88	63.85	5.64	61.72	5.33	59.42	5.03	57.52
-27.5	6.56	66.73	6.39	65.51	6.11	63.93	5.79	61.24	5.44	58.88	5.13	57.12
-25.0	7.00	66.18	6.61	65.35	6.30	63.93	5.91	60.51	5.52	58.16	5.20	56.65
-22.5	7.13	65.56	6.80	65.00	6.46	63.87	5.97	59.50	5.56	57.26	5.22	56.18
-20.0	7.21	64.72	6.92	64.51	6.59	63.83	5.97	58.26	5.55	56.27	5.13	55.78
-17.5	7.24	63.74	6.98	63.91	6.59	63.89	5.91	56.82	5.46	55.24	4.90	55.52
-15.0	7.18	62.67	6.97	63.27	6.33	64.11	5.78	55.27	5.32	54.26	4.69	55.42
-12.5	7.02	61.60	6.81	62.69	7.91	64.52	5.59	53.69	5.03	53.42	6.89	55.42
-10.0	6.71	60.64	6.43	62.24	8.84	65.06	5.33	52.18	5.27	52.76	7.18	55.42
-7.5	6.23	59.89	7.01	61.99	9.34	65.60	4.99	50.86	6.21	52.29	7.23	55.38
-5.0	6.60	59.45	8.25	61.90	9.65	66.05	4.53	49.81	6.39	51.95	7.17	55.30
-2.5	7.17	59.31	8.62	61.89	9.70	66.35	4.46	49.17	6.13	51.71	6.67	55.21
0.0	6.64	59.46	8.79	61.89	9.83	66.46	4.31	48.95	5.37	51.60	6.12	55.16

ตารางภาคผนวก ง3.4.2 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ช่วงระยะ $x = 2.5$ ถึง 200 cm

x (cm)	กรณีมีสายชีลด์ 2 เส้น						กรณีมีสายชีลด์ 3 เส้น					
	$S_{shield} = 6$ cm		$S_{shield} = 18$ cm		$S_{shield} = 26$ cm		$S_{shield} = 9$ cm		$S_{shield} = 13$ cm		$S_{shield} = 17$ cm	
	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)	J_g ($\mu A/m^2$)	E_g (kV/m)
2.5	6.29	59.91	8.63	61.89	9.77	66.35	4.56	49.19	6.06	51.68	6.77	55.20
5.0	6.76	60.65	8.19	61.90	9.61	66.05	4.58	49.84	6.34	51.91	7.11	55.28
7.5	7.04	61.60	7.03	61.98	9.34	65.59	5.02	50.88	6.17	52.25	7.20	55.35
10.0	7.15	62.66	6.51	62.23	8.85	65.04	5.37	52.20	5.21	52.71	7.13	55.38
12.5	7.22	63.72	6.83	62.67	7.84	64.51	5.62	53.71	5.05	53.36	6.84	55.37
15.0	7.17	64.69	6.95	63.24	6.40	64.09	5.79	55.27	5.31	54.20	6.13	55.37
17.5	7.09	65.52	6.93	63.85	6.57	63.87	5.91	56.81	5.45	55.17	4.92	55.47
20.0	6.95	66.14	6.84	64.44	6.60	63.80	5.957	58.23	5.51	56.19	5.10	55.73
22.5	6.78	66.55	6.71	64.92	6.49	63.84	5.95	59.45	5.50	57.17	5.17	56.13
25.0	6.58	66.698	6.55	65.27	6.30	63.88	5.88	60.45	5.45	58.05	5.16	56.60
27.5	6.28	66.62	6.35	65.42	6.06	63.88	5.76	61.18	5.39	58.77	5.09	57.06
30.0	6.01	66.32	6.10	65.39	5.80	63.79	5.60	61.65	5.26	59.31	4.98	57.47
32.5	5.72	65.82	5.83	65.16	5.59	63.56	5.40	61.85	5.09	59.62	4.84	57.76
35.0	5.42	65.15	5.57	64.74	5.34	63.21	5.18	61.82	4.91	59.74	4.67	57.90
37.5	5.11	64.33	5.30	64.15	5.09	62.71	4.96	61.56	4.70	59.64	4.51	57.89
40.0	4.82	63.37	5.01	63.42	4.83	62.08	4.72	61.11	4.50	59.36	4.30	57.71
42.5	4.54	62.32	4.72	62.55	4.57	61.32	4.47	60.50	4.28	58.90	4.11	57.38
45.0	4.26	61.18	4.44	61.57	4.31	60.45	4.23	59.75	4.06	58.30	3.92	56.91
47.5	3.98	59.98	4.17	60.50	4.06	59.49	3.99	58.88	3.84	57.57	3.72	56.30
50.0	3.49	57.46	3.91	59.37	3.81	58.45	3.76	57.92	3.63	56.74	3.52	55.59
55.0	3.44	57.20	3.44	56.96	3.37	56.21	3.33	55.80	3.24	54.84	3.16	53.90
60.0	3.07	54.86	3.04	54.45	2.99	53.83	2.96	53.51	2.90	52.73	2.84	51.96
60.5	2.74	52.26	2.72	51.92	2.68	51.41	2.67	51.16	2.62	50.52	2.58	49.88
65.0	2.49	49.69	2.47	49.41	2.44	48.98	2.44	48.79	2.40	48.26	2.37	47.73
70.0	2.29	47.17	2.28	46.93	2.25	46.57	2.25	46.41	2.23	45.96	2.20	45.51
75.0	2.11	44.66	2.10	44.45	2.07	44.14	2.07	44.01	2.04	43.62	2.01	43.23
80.0	1.85	42.10	1.84	41.91	1.81	41.63	1.80	41.52	1.77	41.17	1.73	40.82
85.0	1.41	39.41	1.38	39.23	1.34	38.97	1.32	38.87	1.28	38.55	1.22	38.22
90.0	0.73	36.56	0.71	36.39	0.67	36.15	0.64	36.06	0.60	35.76	0.55	35.46
95.0	0.18	33.71	0.17	33.56	0.15	33.34	0.14	33.27	0.12	33.00	0.11	32.74
100.0	0	28.84	0	28.73	0	28.58	0	28.53	0	28.34	0	28.15
110.0	0	25.08	0	25.00	0	24.88	0	24.86	0	24.71	0	24.57
120.0	0	22.08	0	22.01	0	21.92	0	21.91	0	21.80	0	21.69
130.0	0	19.63	0	19.58	0	19.51	0	19.50	0	19.41	0	19.32
140.0	0	17.60	0	17.56	0	17.50	0	17.50	0	17.43	0	17.36
150.0	0	15.91	0	15.88	0	15.83	0	15.83	0	15.77	0	15.71
160.0	0	14.48	0	14.45	0	14.41	0	14.42	0	14.36	0	14.32
170.0	0	13.27	0	13.24	0	13.21	0	13.21	0	13.17	0	13.13
180.0	0	12.23	0	12.21	0	12.18	0	12.18	0	12.15	0	12.11
190.0	0	11.33	0	11.32	0	11.29	0	11.30	0	11.26	0	11.23
200.0	0	11.33	0	11.32	0	11.29	0	11.29	0	11.26	0	11.23

ตารางภาคผนวก ง3.5 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่งแบบชั่วคราว ± 250 kV ในรูปที่ 6.16, 6.17

x (m)	ผลจำลอง				งานวิจัย [14]			
	กรณีไม่มีลม		กรณีมีลม $w_r = 0.5$ m/s, $\alpha = 0.3$		กรณีไม่มีลม		กรณีมีลม $w_r = 0.5$ m/s, $\alpha = 0.3$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-20	0	-3.61	0	-2.66	-1.97	-3.42		
-18	0	-4.57	0	-3.36	-2.65	-4.30		
-16	0	-5.84	0	-4.30	-4.10	-5.46		
-14	-0.01	-7.52	0	-5.52	-5.98	-6.99		
-12	-2.03	-9.70	0	-7.11	-8.89	-8.94		
-10	-12.42	-11.87	-0.92	-9.13	-12.56	-10.71	0	-3.68
-9	-16.60	-12.56	-4.81	-10.25	-14.53	-12.57	-6.07	-9.56
-8	-18.89	-12.89	-10.48	-11.18	-16.32	-13.01	-11.45	-12.21
-7	-19.80	-12.85	-14.68	-11.74	-17.61	-13.07	-13.76	-12.79
-6	-19.15	-12.37	-16.59	-11.85	-18.12	-13.09	-14.62	-12.72
-5	-17.29	-11.40	-16.95	-11.48	-17.69	-12.50	-14.44	-12.35
-4	-14.40	-9.94	-15.95	-10.59	-15.81	-11.32	-13.33	-11.76
-3	-10.38	-7.99	-13.55	-9.17	-12.74	-9.78	-11.03	-10.74
-2	-4.88	-5.49	-9.77	-7.21	-9.40	-7.50	-7.95	-9.19
-1	-0.48	-2.49	-4.73	-4.72	-4.96	-4.41	-4.19	-6.99
0	0.01	0.69	-0.45	-1.73	0	0	0	-4.41
1	2.01	3.85	0.02	1.46	4.96	3.68		
2	7.80	6.65	2.01	4.61	9.23	7.35	0	2.06
3	12.81	8.88	8.24	7.40	12.74	9.78	17.09	10.59
4	16.20	10.56	13.43	9.59	15.81	11.32	20.00	12.35
5	18.24	11.72	16.83	11.25	17.69	12.28	21.62	13.24
6	19.00	12.39	19.06	12.43	18.12	13.09	22.14	13.82
7	18.88	12.62	20.46	13.16	17.61	13.04	21.45	13.68
8	17.67	12.47	20.87	13.49	16.32	12.94	20.09	13.38
9	15.12	12.01	20.35	13.47	14.62	12.50	18.12	12.87
10	10.57	11.23	18.83	13.16	12.56	11.99	16.07	12.43
12	1.17	9.03	11.45	11.78	8.89	10.37	11.88	10.88
14	0	7.00	2.00	9.63	5.98	8.97	8.46	9.34
16	0	5.45	0.03	7.55	4.10	7.79	6.07	7.79
18	0	4.28	0	5.94	2.65	6.54	4.36	6.25
20	0	3.39	0	4.71	2.05	5.74	3.25	5.37

ตารางภาคผนวก ง3.6 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง 500 kV HVAC

x (m)	E_g (kV/m)	x (m)	E_g (kV/m)
-30	0.67	0	3.45
-29	0.78	1	3.61
-28	0.89	2	4.04
-27	1.03	3	4.59
-26	1.18	4	5.16
-25	1.35	5	5.68
-24	1.54	6	6.11
-23	1.76	7	6.39
-22	2.01	8	6.54
-21	2.28	9	6.54
-20	2.59	10	6.40
-19	2.93	11	6.15
-18	3.30	12	5.82
-17	3.69	13	5.42
-16	4.12	14	4.99
-15	4.55	15	4.55
-14	4.99	16	4.12
-13	5.42	17	3.69
-12	5.82	18	3.30
-11	6.15	19	2.93
-10	6.40	20	2.59
-9	6.54	21	2.28
-8	6.54	22	2.01
-7	6.39	23	1.76
-6	6.11	24	1.54
-5	5.68	25	1.35
-4	5.16	26	1.18
-3	4.59	27	1.03
-2	4.04	28	0.89
-1	3.61	29	0.78
0	3.45	30	0.67

ตารางภาคผนวก ง3.7 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีไม่มีสายตัวนำ DMRC

x (m)	ไม่มีลม		มีความเร็วลม $w_r = 1.3$ m/s และ $\alpha = 0.4$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	-0.0017	3.32	0	3.02
-29	-0.0030	3.44	0	3.14
-28	-0.0036	3.55	0	3.25
-27	-0.0031	3.67	0	3.37
-26	-0.0018	3.79	0	3.48
-25	-0.0008	3.90	0	3.59
-24	-0.0003	4.01	0	3.69
-23	-0.0001	4.12	0	3.79
-22	0	4.22	0	3.89
-21	0	4.31	0	3.97
-20	0	4.39	0	4.04
-19	0	4.45	0	4.09
-18	0	4.50	0	4.13
-17	0	4.53	0	4.14
-16	0	4.54	0	4.13
-15	0	4.53	0	4.09
-14	0	4.48	0	4.02
-13	0	4.41	0	3.92
-12	0	4.30	0	3.77
-11	0	4.15	0	3.59
-10	0	3.97	0	3.36
-9	0	3.75	0	3.09
-8	0	3.48	0	2.77
-7	0	3.18	0	2.40
-6	0	2.84	0	2.00
-5	0	2.47	0	1.55
-4	0	2.06	0	1.06
-3	-0.0001	1.63	0	0.55
-2	-0.0004	1.17	0	0.09
-1	-0.0005	0.71	0	0.56
0	-0.0001	0.23	0	1.14
1	0.0000	0.24	0	1.72
2	0.0001	0.72	0	2.30
3	0.0003	1.18	0	2.86
4	0.0004	1.61	0	3.42
5	0.0003	2.03	0	3.95
6	0.0002	2.41	0.02	4.46
7	0.0001	2.76	0.10	4.95
8	0	3.08	0.36	5.42
9	0	3.35	0.82	5.84
10	0	3.59	1.40	6.21
11	0	3.78	1.92	6.49
12	0	3.94	2.32	6.70
13	0	4.06	2.57	6.83
14	0	4.15	2.70	6.89
15	0	4.20	2.73	6.89
16	0	4.23	2.68	6.85
17	0	4.23	2.57	6.76
18	0	4.21	2.42	6.64
19	0.0001	4.17	2.24	6.50
20	0.0001	4.11	2.05	6.34
21	0.0001	4.04	1.85	6.17
22	0.0002	3.96	1.65	5.99
23	0.0002	3.87	1.46	5.81
24	0.0002	3.77	1.27	5.63
25	0.0001	3.67	1.11	5.45
26	0	3.56	0.96	5.28
27	0	3.45	0.82	5.11
28	0	3.34	0.70	4.95
29	0	3.23	0.60	4.80
30	0	3.12	0.50	4.66

ตารางภาคผนวก ง3.8 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC

x (m)	ไม่มีลม		มีความเร็วลม $w_r = 1.3$ m/s และ $\alpha = 0.4$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	-0.0004	3.08	0	2.82
-29	-0.0011	3.17	0	2.92
-28	-0.0020	3.26	0	3.01
-27	-0.0028	3.35	0	3.10
-26	-0.0029	3.44	0	3.19
-25	-0.0023	3.52	0	3.27
-24	-0.0014	3.59	0	3.35
-23	-0.0007	3.66	0	3.41
-22	-0.0003	3.71	0	3.47
-21	-0.0001	3.75	0	3.51
-20	0	3.78	0	3.54
-19	0	3.79	0	3.55
-18	0	3.78	0	3.53
-17	0	3.74	0	3.49
-16	0	3.68	0	3.43
-15	0	3.60	0	3.34
-14	0	3.49	0	3.22
-13	0	3.35	0	3.07
-12	0	3.19	0	2.89
-11	0	3.00	0	2.68
-10	0	2.79	0	2.45
-9	0	2.56	0	2.20
-8	0	2.33	0	1.92
-7	-0.0001	2.08	0	1.64
-6	-0.0002	1.82	0	1.34
-5	-0.0004	1.56	0	1.02
-4	-0.0004	1.29	0	0.71
-3	-0.0002	1.02	0	0.38
-2	0	0.74	0	0.06
-1	0	0.46	0	0.28
0	0	0.18	0	0.61
1	0	0.11	0	0.94
2	0	0.39	0	1.26
3	0	0.67	0	1.59
4	0	0.96	0	1.90
5	0	1.23	0	2.21
6	0.0001	1.51	0	2.51
7	0.0001	1.78	0	2.81
8	0.0002	2.04	0	3.10
9	0.0001	2.29	0	3.38
10	0.0001	2.52	0	3.65
11	0.0001	2.73	0	3.91
12	0.0001	2.93	0.01	4.15
13	0.0001	3.10	0.03	4.38
14	0.0001	3.24	0.09	4.58
15	0.0001	3.36	0.20	4.77
16	0.0001	3.45	0.37	4.92
17	0.0001	3.51	0.57	5.04
18	0.0001	3.55	0.77	5.13
19	0.0002	3.56	0.92	5.17
20	0.0002	3.56	1.01	5.17
21	0.0003	3.54	1.03	5.14
22	0.0002	3.50	1.00	5.08
23	0.0002	3.45	0.93	5.00
24	0.0001	3.39	0.84	4.91
25	0	3.32	0.73	4.80
26	0	3.24	0.63	4.69
27	0	3.16	0.53	4.58
28	0	3.07	0.44	4.48
29	0	2.99	0.37	4.37
30	0	2.90	0.30	4.27

ตารางภาคผนวก ง3.9.1 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC

ความเร็วลม $w_{r-avg} = 1.3$ m/s

x (m)	P-to-N wind					
	$\alpha_{min} = 0.2$		$\alpha_{avg} = 0.4$		$\alpha_{max} = 0.6$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	-0.08	3.62	-0.02	4.09	-0.02	4.76
-29	-0.12	3.74	-0.04	4.18	-0.03	4.83
-28	-0.18	3.86	-0.06	4.28	-0.04	4.90
-27	-0.27	3.99	-0.09	4.38	-0.06	4.97
-26	-0.39	4.13	-0.14	4.48	-0.09	5.05
-25	-0.54	4.28	-0.22	4.59	-0.12	5.12
-24	-0.74	4.43	-0.34	4.71	-0.17	5.20
-23	-0.96	4.58	-0.50	4.83	-0.26	5.28
-22	-1.21	4.73	-0.72	4.96	-0.38	5.36
-21	-1.47	4.88	-1.00	5.09	-0.55	5.44
-20	-1.70	5.02	-1.31	5.22	-0.80	5.53
-19	-1.90	5.15	-1.63	5.34	-1.11	5.62
-18	-2.03	5.24	-1.92	5.45	-1.48	5.71
-17	-2.07	5.30	-2.14	5.53	-1.85	5.78
-16	-2.01	5.32	-2.27	5.56	-2.17	5.83
-15	-1.84	5.28	-2.28	5.56	-2.38	5.84
-14	-1.56	5.20	-2.16	5.50	-2.45	5.80
-13	-1.19	5.05	-1.93	5.38	-2.39	5.71
-12	-0.80	4.86	-1.59	5.21	-2.19	5.55
-11	-0.45	4.63	-1.17	4.98	-1.89	5.34
-10	-0.20	4.38	-0.73	4.70	-1.50	5.07
-9	-0.07	4.10	-0.37	4.39	-1.03	4.76
-8	-0.02	3.82	-0.13	4.06	-0.57	4.40
-7	0	3.53	-0.03	3.73	-0.23	4.02
-6	0	3.23	-0.01	3.41	-0.06	3.65
-5	0	2.93	0	3.08	-0.01	3.28
-4	0	2.62	0	2.74	0	2.91
-3	0	2.30	0	2.40	0	2.55
-2	0	1.97	0	2.05	0	2.18
-1	0	1.63	0	1.70	0	1.81
0	0	1.28	0	1.34	0	1.44
1	0	0.92	0	0.97	0	1.06
2	0	0.56	0	0.60	0	0.68
3	0	0.20	0	0.23	0	0.30
4	0	0.16	0	0.14	0	0.09
5	0	0.52	0	0.49	0	0.43
6	0	0.86	0	0.84	0	0.78
7	0	1.20	0	1.18	0	1.12
8	0	1.52	0	1.50	0	1.45
9	0	1.82	0	1.80	0	1.75
10	0	2.10	0	2.08	0	2.03
11	0	2.36	0	2.34	0	2.28
12	0	2.58	0	2.57	0	2.51
13	0	2.78	0	2.76	0	2.70
14	0	2.95	0	2.93	0	2.87
15	0	3.09	0	3.06	0	3.00
16	0	3.19	0	3.17	0	3.10
17	0	3.27	0	3.24	0	3.17
18	0	3.32	0	3.29	0	3.22
19	0	3.34	0	3.31	0	3.24
20	0	3.35	0	3.31	0	3.24
21	0	3.33	0	3.30	0	3.22
22	0	3.30	0	3.26	0	3.18
23	0	3.26	0	3.21	0	3.13
24	0	3.20	0	3.15	0	3.07
25	0	3.13	0	3.08	0	3.00
26	0	3.06	0	3.01	0	2.92
27	0	2.98	0	2.93	0	2.84
28	0	2.90	0	2.84	0	2.75
29	0	2.81	0	2.75	0	2.66
30	0	2.72	0	2.66	0	2.57

ตารางภาคผนวก ง3.9.2 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC

ความเร็วลม $w_{r-avg} = 1.3$ m/s

x (m)	N-to-P wind					
	$\alpha_{min} = 0.2$		$\alpha_{ave} = 0.4$		$\alpha_{max} = 0.6$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	0	2.90	0	2.82	0	2.73
-29	0	3.00	0	2.92	0	2.83
-28	0	3.09	0	3.01	0	2.92
-27	0	3.18	0	3.10	0	3.02
-26	0	3.26	0	3.19	0	3.11
-25	0	3.34	0	3.27	0	3.19
-24	0	3.42	0	3.35	0	3.27
-23	0	3.48	0	3.41	0	3.34
-22	0	3.53	0	3.47	0	3.40
-21	0	3.57	0	3.51	0	3.45
-20	0	3.59	0	3.54	0	3.47
-19	0	3.60	0	3.55	0	3.49
-18	0	3.58	0	3.53	0	3.48
-17	0	3.54	0	3.49	0	3.44
-16	0	3.47	0	3.43	0	3.38
-15	0	3.38	0	3.34	0	3.29
-14	0	3.26	0	3.22	0	3.18
-13	0	3.10	0	3.07	0	3.03
-12	0	2.92	0	2.89	0	2.85
-11	0	2.71	0	2.68	0	2.65
-10	0	2.48	0	2.45	0	2.42
-9	0	2.22	0	2.20	0	2.17
-8	0	1.95	0	1.92	0	1.90
-7	0	1.66	0	1.64	0	1.61
-6	0	1.36	0	1.34	0	1.31
-5	0	1.05	0	1.02	0	1.00
-4	0	0.73	0	0.71	0	0.68
-3	0	0.41	0	0.38	0	0.35
-2	0	0.08	0	0.06	0	0.06
-1	0	0.24	0	0.28	0	0.32
0	0	0.56	0	0.61	0	0.66
1	0	0.89	0	0.94	0	1.00
2	0	1.20	0	1.26	0	1.33
3	0	1.51	0	1.59	0	1.67
4	0	1.81	0	1.90	0	2.00
5	0	2.11	0	2.21	0	2.34
6	0	2.39	0	2.51	0	2.66
7	0	2.67	0	2.81	0	2.99
8	0	2.94	0	3.10	0	3.31
9	0	3.20	0	3.38	0	3.63
10	0	3.44	0	3.65	0	3.94
11	0	3.67	0	3.91	0.01	4.24
12	0	3.88	0.01	4.15	0.05	4.53
13	0	4.06	0.03	4.38	0.16	4.81
14	0.01	4.23	0.09	4.58	0.34	5.07
15	0.03	4.37	0.20	4.77	0.60	5.30
16	0.08	4.49	0.37	4.92	0.88	5.49
17	0.16	4.58	0.57	5.04	1.11	5.63
18	0.28	4.64	0.77	5.13	1.25	5.72
19	0.41	4.68	0.92	5.17	1.31	5.76
20	0.55	4.69	1.01	5.17	1.30	5.77
21	0.67	4.67	1.03	5.14	1.23	5.75
22	0.75	4.62	1.00	5.08	1.13	5.70
23	0.78	4.54	0.93	5.00	1.01	5.64
24	0.78	4.45	0.84	4.91	0.89	5.56
25	0.74	4.34	0.73	4.80	0.78	5.49
26	0.68	4.21	0.63	4.69	0.67	5.41
27	0.61	4.09	0.53	4.58	0.58	5.33
28	0.52	3.95	0.44	4.48	0.49	5.25
29	0.43	3.82	0.37	4.37	0.42	5.17
30	0.35	3.69	0.30	4.27	0.36	5.10

ตารางภาคผนวก ง3.9.3 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC

ความเร็วลม $w_{r-max} = 1.6$ m/s

x (m)	P-to-N wind					
	$\alpha_{min} = 0.2$		$\alpha_{avg} = 0.4$		$\alpha_{max} = 0.6$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	-0.54	4.16	-0.42	4.78	-0.51	5.65
-29	-0.66	4.29	-0.51	4.89	-0.63	5.74
-28	-0.81	4.43	-0.62	5.01	-0.76	5.83
-27	-0.97	4.58	-0.75	5.13	-0.92	5.93
-26	-1.16	4.73	-0.91	5.25	-1.09	6.04
-25	-1.36	4.88	-1.09	5.38	-1.28	6.15
-24	-1.56	5.03	-1.30	5.51	-1.49	6.25
-23	-1.75	5.18	-1.53	5.63	-1.71	6.36
-22	-1.91	5.31	-1.76	5.76	-1.95	6.46
-21	-2.02	5.43	-1.99	5.87	-2.18	6.54
-20	-2.05	5.51	-2.19	5.96	-2.40	6.61
-19	-1.99	5.57	-2.33	6.03	-2.59	6.66
-18	-1.82	5.59	-2.39	6.06	-2.73	6.68
-17	-1.54	5.56	-2.32	6.05	-2.79	6.66
-16	-1.19	5.48	-2.12	5.99	-2.74	6.59
-15	-0.81	5.36	-1.78	5.87	-2.56	6.47
-14	-0.48	5.19	-1.34	5.70	-2.23	6.28
-13	-0.23	5.00	-0.87	5.47	-1.76	6.03
-12	-0.09	4.78	-0.47	5.20	-1.20	5.73
-11	-0.03	4.54	-0.20	4.91	-0.67	5.38
-10	-0.01	4.29	-0.07	4.60	-0.30	5.01
-9	0	4.02	-0.02	4.29	-0.10	4.63
-8	0	3.75	0	3.98	-0.02	4.26
-7	0	3.46	0	3.66	0	3.90
-6	0	3.17	0	3.34	0	3.53
-5	0	2.87	0	3.01	0	3.17
-4	0	2.56	0	2.68	0	2.81
-3	0	2.24	0	2.35	0	2.45
-2	0	1.92	0	2.00	0	2.09
-1	0	1.58	0	1.65	0	1.72
0	0	1.23	0	1.29	0	1.35
1	0	0.88	0	0.93	0	0.97
2	0	0.52	0	0.57	0	0.60
3	0	0.16	0	0.20	0	0.23
4	0	0.19	0	0.16	0	0.13
5	0	0.54	0	0.51	0	0.49
6	0	0.88	0	0.85	0	0.83
7	0	1.21	0	1.18	0	1.16
8	0	1.53	0	1.50	0	1.48
9	0	1.82	0	1.80	0	1.77
10	0	2.10	0	2.07	0	2.05
11	0	2.35	0	2.32	0	2.29
12	0	2.58	0	2.54	0	2.51
13	0	2.77	0	2.74	0	2.70
14	0	2.93	0	2.90	0	2.86
15	0	3.07	0	3.03	0	2.99
16	0	3.17	0	3.13	0	3.08
17	0	3.25	0	3.20	0	3.15
18	0	3.29	0	3.24	0	3.19
19	0	3.32	0	3.26	0	3.21
20	0	3.32	0	3.26	0	3.21
21	0	3.30	0	3.24	0	3.18
22	0	3.27	0	3.21	0	3.14
23	0	3.22	0	3.16	0	3.09
24	0	3.16	0	3.09	0	3.02
25	0	3.09	0	3.02	0	2.95
26	0	3.02	0	2.95	0	2.87
27	0	2.93	0	2.86	0	2.78
28	0	2.85	0	2.77	0	2.69
29	0	2.76	0	2.68	0	2.60
30	0	2.67	0	2.59	0	2.51

ตารางภาคผนวก ง3.9.4 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC กรณีมีสายตัวนำ DMRC

ความเร็วลม $w_{r-max} = 1.6$ m/s

x (m)	N-to-P wind					
	$\alpha_{min} = 0.2$		$\alpha_{avg} = 0.4$		$\alpha_{max} = 0.6$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	0	2.84	0	2.75	0	2.66
-29	0	2.94	0	2.85	0	2.76
-28	0	3.03	0	2.95	0	2.86
-27	0	3.12	0	3.04	0	2.96
-26	0	3.21	0	3.13	0	3.05
-25	0	3.29	0	3.22	0	3.14
-24	0	3.37	0	3.29	0	3.22
-23	0	3.43	0	3.36	0	3.29
-22	0	3.49	0	3.42	0	3.35
-21	0	3.53	0	3.47	0	3.40
-20	0	3.56	0	3.50	0	3.43
-19	0	3.56	0	3.51	0	3.45
-18	0	3.55	0	3.50	0	3.44
-17	0	3.51	0	3.46	0	3.41
-16	0	3.45	0	3.40	0	3.36
-15	0	3.36	0	3.31	0	3.27
-14	0	3.24	0	3.20	0	3.16
-13	0	3.09	0	3.05	0	3.02
-12	0	2.91	0	2.88	0	2.84
-11	0	2.70	0	2.67	0	2.64
-10	0	2.47	0	2.44	0	2.42
-9	0	2.22	0	2.19	0	2.17
-8	0	1.95	0	1.93	0	1.90
-7	0	1.66	0	1.64	0	1.62
-6	0	1.37	0	1.34	0	1.32
-5	0	1.06	0	1.03	0	1.01
-4	0	0.74	0	0.72	0	0.69
-3	0	0.42	0	0.39	0	0.36
-2	0	0.10	0	0.06	0	0.06
-1	0	0.23	0	0.27	0	0.33
0	0	0.55	0	0.61	0	0.68
1	0	0.88	0	0.95	0	1.04
2	0	1.20	0	1.29	0	1.40
3	0	1.52	0	1.62	0	1.76
4	0	1.83	0	1.96	0	2.12
5	0	2.13	0	2.29	0	2.49
6	0	2.43	0	2.62	0	2.86
7	0	2.73	0	2.94	0	3.23
8	0	3.01	0	3.26	0	3.60
9	0	3.29	0	3.58	0	3.97
10	0	3.55	0	3.89	0	4.34
11	0	3.80	0	4.18	0	4.70
12	0	4.03	0	4.45	0	5.05
13	0	4.23	0	4.71	0.01	5.38
14	0	4.42	0	4.95	0.05	5.70
15	0	4.57	0.02	5.16	0.16	6.01
16	0	4.71	0.05	5.36	0.42	6.31
17	0.01	4.81	0.13	5.53	0.82	6.58
18	0.03	4.90	0.28	5.68	1.30	6.81
19	0.07	4.97	0.48	5.81	1.77	7.00
20	0.14	5.01	0.73	5.91	2.14	7.13
21	0.24	5.04	0.99	5.98	2.39	7.21
22	0.36	5.05	1.21	6.02	2.52	7.24
23	0.49	5.05	1.39	6.03	2.56	7.23
24	0.62	5.02	1.50	6.01	2.52	7.19
25	0.73	4.98	1.56	5.96	2.43	7.13
26	0.82	4.92	1.57	5.89	2.31	7.05
27	0.89	4.84	1.54	5.81	2.17	6.95
28	0.93	4.76	1.49	5.72	2.02	6.85
29	0.95	4.67	1.42	5.62	1.87	6.75
30	0.94	4.57	1.34	5.51	1.72	6.64

ตารางภาคผนวก ง3.10 ผลจำลองที่ระดับพื้นดินของสายส่ง ± 500 kV HVDC วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ

x (m)	ไม่มีลม		มีความเร็วลม $w_{r-spec} = 0.6$ m/s และ $\alpha = 0.4$	
	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)	J_g (nA/m ²)	E_g (kV/m)
-30	-0.11	4.17	0	3.40
-29	-0.18	4.33	0	3.52
-28	-0.24	4.48	0	3.65
-27	-0.28	4.63	0	3.77
-26	-0.28	4.78	0	3.90
-25	-0.26	4.92	0	4.01
-24	-0.26	5.07	0	4.12
-23	-0.29	5.22	0	4.23
-22	-0.37	5.37	0	4.32
-21	-0.51	5.52	0	4.40
-20	-0.66	5.66	0	4.46
-19	-0.84	5.78	-0.01	4.50
-18	-1.02	5.88	-0.02	4.52
-17	-1.20	5.95	-0.04	4.51
-16	-1.38	5.98	-0.06	4.47
-15	-1.56	5.97	-0.07	4.40
-14	-1.72	5.92	-0.07	4.30
-13	-1.85	5.83	-0.07	4.16
-12	-1.91	5.68	-0.06	3.98
-11	-1.93	5.48	-0.06	3.78
-10	-1.91	5.23	-0.05	3.54
-9	-1.84	4.93	-0.05	3.28
-8	-1.71	4.60	-0.05	3.00
-7	-1.55	4.23	-0.05	2.69
-6	-1.37	3.83	-0.05	2.36
-5	-1.16	3.40	-0.05	2.00
-4	-0.95	2.95	-0.04	1.62
-3	-0.75	2.47	-0.04	1.21
-2	-0.54	1.97	-0.03	0.77
-1	-0.33	1.44	-0.01	0.29
0	-0.13	0.88	0.00	0.26
1	-0.01	0.32	0.00	0.76
2	0.01	0.31	0.00	1.35
3	0.03	0.84	0.01	1.97
4	0.09	1.39	0.09	2.63
5	0.20	1.90	0.34	3.33
6	0.32	2.37	0.71	4.02
7	0.42	2.80	1.13	4.71
8	0.50	3.19	1.66	5.39
9	0.55	3.54	2.26	6.03
10	0.58	3.85	2.78	6.62
11	0.58	4.11	3.27	7.16
12	0.56	4.32	3.69	7.63
13	0.51	4.49	4.01	8.03
14	0.45	4.61	4.23	8.36
15	0.36	4.69	4.39	8.62
16	0.28	4.73	4.49	8.81
17	0.21	4.74	4.53	8.94
18	0.16	4.73	4.50	9.02
19	0.12	4.69	4.42	9.04
20	0.09	4.63	4.30	9.01
21	0.07	4.56	4.14	8.94
22	0.05	4.47	3.96	8.83
23	0.03	4.37	3.76	8.70
24	0.02	4.26	3.54	8.54
25	0.01	4.15	3.32	8.37
26	0.00	4.02	3.10	8.18
27	0.00	3.90	2.88	7.98
28	0.00	3.77	2.67	7.78
29	0.00	3.65	2.46	7.57
30	0.00	3.52	2.27	7.35

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	แคทรียา ชูพุ่ม
วัน เดือน ปี เกิด	24 มกราคม 2522
สถานที่เกิด	กรุงเทพ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2550
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 35/35 หมู่บ้านปริญญดาสามัคคี ซอยสามัคคี 58/10 แขวงท่าทราย อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000
ผลงานตีพิมพ์	1. Cattareya Choopum and Boonchai Techaumnat, “Investigation of the Effects of Ion Diffusivity on the Ion Flow Field Simulation”, 19th Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2022), pp. 1-5, 2022. 2. Cattareya Choopum and Boonchai Techaumnat, "Numerical Investigation on the Effects of Wind and Shielding Conductor on the Ion Flow Fields of HVDC Transmission Lines" Energies 2023, Volume 16, Issue no. 1, 198. 3. Cattareya Choopum, Kiangkrai Odethanu and Boonchai Techaumnat, "Influence of Wind Direction on the Ion Flow Field of 500kV HVDC Lines”, The 2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Krabi, Thailand, 2023.
รางวัลที่ได้รับ	1. Best paper award at the 19th Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2022). 2. Best paper award at the International Electrical Engineering Congress 2023 (iEECON 2023)