หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

แบบจำลองในกรณีศึกษา

4.1 แบบจำลอง

เสาสายส่งไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย เป็นชนิด DA1 ในสาย 230 เควี โครงการประจวบคีรีขันธ์-สุราษฎร์ธานี และมีความสูงของโครงสร้างทั้งสิ้น 46.7 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ช่วงห่างระหว่างเสาสายส่งที่ใช้ในการออกแบบ (Ruling span) เท่ากับ 430 เมตร มีมุมระหว่างสาย (Line angle) $0-1^{\circ}$ สายป้องกันฟ้าผ่า 2 เส้นติดตั้งที่ตำแหน่งสูงสุดของโครงสร้าง เส้นผ่านศูนย์กลาง (Nominal diameter) 9.144 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 0.406 กิโลกรัม/เมตร มีการเดินสายไฟฟ้า 2 วงจรทางด้านซ้ายและขวาของแขนเสาสายส่ง วงจรละ 3 เส้น สายไฟฟ้ามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 33.91 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 2.040 กิโลกรัม/เมตร เสาสายส่งไฟฟ้านี้ เป็นชนิดที่ใช้แขวนสาย (Suspension tower)

การจำลองโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้าแบบไฟไนต์เอเลเมนต์ในระบบดิสครีต โดยทั่วไปถ้าหากหน้าในแนวขนานและแนวขวางกับสายไฟฟ้าต่างอยู่ในระนาบเดียวกันตลอด ก็มักจำลองโครงสร้างเป็นโครงถักระนาบหรือชิ้นส่วนรับแรงในแนวแกน (Axial bar element) สองมิติ และคิดแยกในสองทิศทาง การจำลองเช่นนี้ การรับแรงของแต่ละระนาบของเสาสายส่งไฟฟ้าจะแยกกันเด่นชัด และการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้นก็จะทำได้ง่าย แต่ไม่อาจให้ผลอันดับที่สองของโครงสร้างที่ถูกต้องได้

สำหรับการจำลองเสาสายส่งให้เป็นโครงสร้างสามมิตินั้น โดยทั่วไปโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้ามีลักษณะเป็นโครงถักที่มีพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนเป็นหลัก จึงเหมาะแก่การจำลองเป็นโครงถักสามมิติ แต่สำหรับเสาสายส่งไฟฟ้าชนิด DA1 ที่ใช้ในกรณีศึกษานี้มีชิ้นส่วนทแยง (Diagonal) เหลื่อมกัน (Stagger) บนระนาบในแนวขนานและแนวขวางกับสายไฟฟ้าซึ่งจะทำให้โครงสร้างไม่มีเสถียรภาพหากจำลองเป็นโครงถัก ดังนั้นจึงได้จำลองเสาสายส่งไฟ

ฟ้าดังกล่าวเป็นโครงข้อแข็งสามมิติในส่วนขาของโครงสร้าง สำหรับชิ้นส่วนทแยง (Bracings) และชิ้นส่วนอื่นๆ จำลองให้เป็นชิ้นส่วนรับแรงในแนวแกน

รูปที่ 4.1 แสดงรูปด้านข้างของแบบจำลองเสาสายส่งไฟฟ้าพร้อมหมายเลขจุดต่อ (Joints) และรูปที่ 4.2 แสดงหมายเลขเอเลเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง โคออร์ดิเนตของจุดต่อเอเลเมนต์ให้ไว้ในภาคผนวก ก ส่วนภาคผนวก ข แสดงการเชื่อมต่อจุดต่อ (Connectivity) ของเอเลเมนต์และคุณสมบัติของชิ้นส่วน

4.2 แรงที่กระทำบนแบบจำลองในกรณีศึกษา

ในหัวข้อนี้ จะแสดงวิธีการกำหนดแรงที่กระทำบนแบบจำลอง รวมทั้งไดอะแกรมแรงในสภาพรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ทั้งที่ทำการวิเคราะห์ด้วยข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา

4.2.1 ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า แรงที่จะต้องนำมาพิจารณาในเบื้องต้น คือ แรงลม และน้ำหนักบรรทุกคงที่ ซึ่งแรงทั้งสองชนิดได้คิดเฉลี่ยจากแต่ละชิ้นส่วนไปที่ปลายหรือจุดต่อทั้งสองข้าง สำหรับกรณีของแรงลมในสภาพรับน้ำหนักต่างๆ จากข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ความเร็วและแรงดันลมที่กระทำต่อโครงสร้างมีค่าดังนี้

จากความเร็วลมอ้างอิง หรือความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร โดยคิดที่คาบการกลับ 50 ปี ที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศบริเวณใกล้เคียงกับแนวสายส่ง ซึ่งมีค่า 30.3 เมตร/วินาที ทำการปรับแก้ด้วยค่า 1.18 เพื่อแปลงความเร็วลมไปในสภาพพื้นที่โล่ง เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศไม่ได้อยู่ในพื้นผิวโล่ง จะได้ความเร็วลมอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 35.7 เมตร/วินาที ซึ่งเทียบเท่าความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง เท่ากับ

34.4 ($\approx 35.7/\sqrt{1.08}$) เมตร/วินาที และเมื่อคิดรวมผลของตัวคูณน้ำหนักบรรทุก 1.3 จะได้ความเร็วลมประลัยเท่ากับ 39.2 ($\approx 34.4\sqrt{1.3}$) เมตร/วินาที

ความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า ให้พิจารณาที่ความสูงเฉลี่ยของเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า อยู่ที่ระดับ 22 เมตร โดยความสูงเฉลี่ยของเสาสายส่งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง และความสูงเฉลี่ยของสายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับความสูงที่ระดับที่ติดตั้งสายไฟฟ้าลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้างของสายไฟฟ้า เมื่อคิดที่คาบการกลับ 50 ปี หรือกรณีแรงลมสูง (High wind) ความเร็วลมออกแบบสำหรับเสาสายส่ง (คือรวมผลของตัวคูณผลกระโชก) และสายไฟฟ้า (ไม่รวมผลของตัวคูณผลกระโชก) ได้จากการแทนค่าในสมการที่ (2.5) และ (2.6) เท่ากับ 52 และ 40 เมตร/วินาที ตามลำดับ แรงดันลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า จะได้จากการแทนค่าความเร็วลมดังกล่าวในสมการที่ (2.2) เท่ากับ 169 และ 100 กิโลกรัม/ตารางเมตร ตามลำดับ สำหรับทิศทางที่แรงลมกระทำต่อเสาสายส่ง ได้แก่ ทิศตั้งฉากและขนานแนวสายไฟฟ้า และทิศทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากสายไฟ เมื่อ ψ= 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา

สำหรับกรณีสายไฟหรือสายฉนวนขาด ที่พิจารณาในสภาพแรงลมปานกลาง (Medium wind) หรือความเร็วลมเมื่อคิดที่คาบการกลับ 10 ปี จากข้อมูลลมของสถานีตรวจอากาศ สามารถหาความเร็วลมอ้างอิง ที่คาบการกลับ 10 ปี โดยใช้สมการที่ (2.3) และตารางที่ 2.1 และมีค่าเท่ากับ 28.3 เมตร/วินาที กรณีนี้จะมีความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า เท่ากับ 42 และ 32 เมตร/วินาที ตามลำดับ และแรงดันลมที่ใช้ในการออกแบบมีค่า 108 และ 64 กิโลกรัม/ตารางเมตร เมื่อกระทำต่อเสาสายส่งและสายไฟฟ้า ตามลำดับ

ในกรณีบำรุงรักษา ซึ่งคิดในสภาพแรงลมที่เกิดขึ้นบ่อยๆ (Most frequent wind) ความเร็วลมที่เกิดขึ้นบ่อยๆ เมื่อวัดที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16 เมตร/วินาที เมื่อแปลงให้เป็นความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า จะได้ 23 และ 18 เมตร/วินาที ตามลำดับ และแรงดันลมที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 34 และ 20 กิโลกรัม/ตารางเมตร เมื่อกระทำต่อเสาสายส่ง และสายไฟฟ้า

จากแรงดันลมที่ได้ สามารถนำไปใช้หาค่าแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง ทั้งในส่วนของเสาสายส่งและสายไฟฟ้า โดยแทนค่าในสมการที่ (2.1) และนำเสนอเป็นไดอะแกรมแรงในสภาพรับน้ำหนักต่างๆ ซึ่งจะมีทั้งส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ และแรงลม ที่กระทำต่อเสาสายส่งและที่ตำแหน่งที่ติดตั้งสายไฟ เนื่องจากสายไฟขาดหรือกรณีบำรุงรักษา ไดอะแกรมแรงนี้แสดงอยู่ในภาคผนวก ค และ ง ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดสภาพรับน้ำหนักต่างๆ

การวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้นโดยใช้ข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จะแบ่งเป็นกรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายไฟ (แทนด้วย EGAT1) และกรณีที่ติดตั้งสายไฟฟ้าแล้ว (แทนด้วย EGAT2) ดังจะแสดงผลการวิเคราะห์ในบทถัดไป

4.2.2 ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ

สำหรับการวิเคราะห์ออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ให้ใช้ความเร็วลมพื้นฐาน (Basic wind speed) หรือความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร เมื่อคิดที่คาบการกลับ 50 ปี ในพื้นผิวโล่ง ซึ่งค่าความเร็วลมพื้นฐานสำหรับประเทศไทย แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ในที่นี้ใช้ค่า 26.5 เมตร/วินาที (Mikitiuk และคณะ, 1995) ในบริเวณที่มักเกิดไต้ฝุ่น (Typhoon region) และมีตัวคูณลดเนื่องจากทิศทางลม 0.85 และตัวคูณเพิ่มความเสี่ยงของระบบสายส่งภายใต้พายุไต้ฝุ่น 1.4 จะได้ค่าความเร็วลมในการออกแบบเท่ากับ 31.7 เมตร/วินาที หรืออีกนัยหนึ่งจากการวิเคราะห์ย้อนหาความเร็วของพายุไต้ฝุ่นเกย์ (Mikitiuk และคณะ, 1995) ได้ค่าเท่ากับ 37.5 เมตร/วินาที เมื่อคิดเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร เมื่อออกแบบโดยใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกสำหรับแรงลม 1.4 ในการออกแบบโดยวิธีประลัย และพิจารณาให้โครงสร้างมีกำลังประลัยเพียงพอที่จะต้านผลจากพายุซึ่งเทียบเท่ากับพายุไต้ฝุ่นเกย์แล้ว จะได้ความเร็วลมในการออกแบบเท่ากับ $37.5/\sqrt{1.4} = 31.7$ เมตร/วินาที เช่นเดียวกัน

ค่าแรงดันลมอ้างอิง ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า มีค่า 62.7 กิโลกรัม/ตารางเมตร ได้จากการแทนค่าความเร็วลมในการออกแบบในสมการที่ (2.11) ในการหาตัวคูณผลสภาพพื้นผิวและตัวคูณผลรูปร่างสำหรับเสาสายส่ง จะมีการแบ่งเสาสายส่งออกเป็นส่วนย่อยๆ สำหรับในแบบจำลองที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ จะแบ่งออกเป็น 7 ส่วน ดัง

แสดงในรูปที่ 4.4 ค่าตัวคูณผลสภาพพื้นผิวได้จากสมการที่ (2.13) หรือตารางที่ 2.7 ส่วนตัวคูณผลรูปร่างสำหรับเสาสายส่งได้จากตารางที่ 2.8 ซึ่งค่าเหล่านี้จะปรากฏในตารางที่ 4.2 และ 4.3 เพื่อใช้ในการคำนวณแรงลมที่กระทำบนโครงสร้าง เมื่อทำการออกแบบด้วยข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ

ค่าตัวคูณผลพลศาสตร์บนโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า แบ่งเป็นส่วนเสาสายส่งและส่วนของสายไฟฟ้า ในส่วนของตัวคูณผลพลศาสตร์บนเสาสายส่ง แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่พิจารณาเฉพาะเสาสายส่ง โดยยังไม่ติดตั้งสายไฟฟ้า และกรณีที่พิจารณารวมกับสายไฟฟ้า ค่าตัวคูณผลพลศาสตร์นี้ คำนวณได้จากสมการที่ (2.20), (2.24) และ (2.25) ซึ่งขึ้นกับค่าความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง ซึ่งมีค่า 1.67 และ 0.93 เฮิรตซ์ ในสภาพที่ไม่มีสายไฟและสภาพที่ติดตั้งสายไฟฟ้าแล้ว ตามลำดับ จะได้ค่าตัวคูณผลพลศาสตร์บนเสาสายส่งสำหรับสองกรณีดังกล่าว เท่ากับ 1.91 และ 2.12 สำหรับตัวคูณผลพลศาสตร์บนสายไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ (2.19), (2.21) และ (2.23) จะมีค่าสำหรับสายไฟฟ้าเมื่อใช้ความสูงของสายไฟเส้นสูงสุดเท่ากับ 1.38 และค่าตัวคูณผลพลศาสตร์สำหรับสายป้องกันฟ้าผ่าเท่ากับ 1.35

เช่นเดียวกับการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าด้วยข้อกำหนดการออกแบบที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แรงที่จะต้องนำมาพิจารณาบนโครงสร้าง ได้แก่ แรงลม และน้ำหนักบรรทุกคงที่ ในส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ให้ใช้ค่าในภาคผนวก ค เช่นเดียวกัน สำหรับส่วนของแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างนั้น ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างในทิศตั้งฉากและขนานสายไฟฟ้าตามลำดับ ตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างในทิศทำมุมกับแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า เท่ากับ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา สำหรับตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงการคิดแรงแพชโหลดในทิศตั้งฉาก และขนานสายไฟฟ้า ตามลำดับ ดังรายละเอียดในสภาพรับน้ำหนักดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2

การพิจารณาสภาพรับน้ำหนักในการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า มีในกรณีที่แรงลมกระทำดังค่าในตารางที่ 4.2 ถึง 4.7 ซึ่งมีการพิจารณาทั้งในกรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายไฟฟ้า (แทนด้วย UWO1) และติดตั้งสายไฟฟ้าแล้ว (แทนด้วย UWO2) ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ ได้ใช้ตามการออกแบบด้วยวิธีประลัย คือเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เต็มที่ ให้ใช้ 0.75 x (1.5DL+1.8WL) หรือประมาณ 1.125DL+1.4WL เมื่อ DL แทนน้ำหนักบรรทุกคงที่

และ WL แทนแรงลม สำหรับกรณีที่ลดน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างให้น้อยที่สุด คือเพื่อให้เกิดแรงถอนมากที่สุด นั่นคือ 0.75 x (0.9DL+1.8WL) ไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษานี้ เนื่องจากเสาสายส่งโดยทั่วไปควบคุมด้วยแรงอัดเป็นหลัก ในกรณีหลังจึงไม่วิกฤติ

4.3 การตรวจสอบแบบจำลอง

แบบจำลองเสาสายส่งไฟฟ้า DA1 ดังกล่าวข้างต้น เมื่อออกแบบให้รับแรงตามข้อกำหนดการออกแบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อนำแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์ออกแบบของบริษัท เอส เอ อี จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่ปรึกษาและออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าโครงการนี้ให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยเปรียบเทียบแรงภายในบางชิ้นส่วนในสภาพรับน้ำหนักเดียวกัน คือแรงลมสูงในทิศทางทำมุม 15° กับเส้นตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า โดยคิดกรณีที่ติดตั้งสายไฟฟ้าแล้ว จะได้ว่าแรงภายในที่วิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองดังกล่าว เมื่อใช้โปรแกรม GTSTRUDL มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากบริษัท เอส เอ อี จำกัด คือมีความแตกต่างไม่เกิน 7.6 % ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นเพราะในการวิจัยนี้ได้จำลองเสาสายส่งให้เป็นโครงข้อแข็งสามมิติในชิ้นส่วนขา แต่บริษัท เอส เอ อี ได้ออกแบบเสาสายส่งนี้โดยจำลองเป็นโครงข้อหมุนสามมิติ นอกจากนี้การกระจายของแรงหรือน้ำหนักบรรทุกบนเสาสายส่งที่ใช้ยังแตกต่างกัน โดยผลรวมของแรงที่กระทำบนแบบจำลองที่ใช้โดยบริษัท เอส เอ อี มีค่ามากกว่าที่ใช้ในการวิจัย 4.5 และ 2.2% สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่และแรงลมลัพธ์ ตามลำดับ

4.4 การออกแบบเสาสายส่ง

ในการออกแบบเสาสายส่ง เมื่อให้แบบจำลองโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้านี้รับแรง จะมีแรงดัดจำนวนหนึ่งเกิดขึ้นในชิ้นส่วนคานสามมิติ แต่แรงดัดนี้มีค่าน้อยมากไม่เกิน 12.3% ของกำลังรับแรงดัดของหน้าตัด เมื่อโครงสร้างรับแรงตามข้อกำหนดการออกแบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 จึงอาจออกแบบชิ้นส่วนดังกล่าวโดยคิดแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียวได้ และสำหรับกำลังรับแรงของชิ้นส่วนคำนวณโดยใช้แนวทางจากคู่มือการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า Manual 52 (ASCE, 1988) ดังรายละเอียดในภาคผนวก จ