บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์

ในการวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงลมกระทำกับเสาส่งไฟฟ้าเท่านั้น (ไม่รวมน้ำหนักตัวเอง) เพื่อจะได้เปรียบเทียบกับข้อกำหนดอื่นซัดเจน เนื่องจากโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าเป็นโครงสร้างลักษณะสมมาตร ภายใต้แรงลมกระทำซึ่งสมมุติให้เป็นชนิดปฏิสมมาตร (Antisymmetric loading) จะเกิดหน่วยแรงดึงและแรงอัดเท่ากัน แต่เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึง หน่วยแรงอัดจึงเป็นตัวกำหนดการออกแบบโดยทั่วไป ในการเสนอผลการวิเคราะห์นี้จึงพิจารณาเฉพาะแรงอัดเท่านั้น และจะเลือกพิจารณาเฉพาะชิ้นส่วนที่สำคัญที่รับแรงค่อนข้างสูง อันได้แก่ชิ้นส่วนขาซึ่งประกอบด้วย F3A,F2,F1,P9,เสาสั้น และชิ้นส่วนทแยงซึ่งประกอบ F3AT-L,F2T-L,F1T-L,P9T-L ตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.1

5.1 ผลการวิเคราะห์ทางด้านสถิตย์ศาสตร์

หน่วยแรงลมที่ใช้ในการในการวิเคราะห์ ใช้ข้อมูลจาก 2 แหล่งคือ ข้อมูลลมภาคใต้ของประเทศไทย และข้อมูลลมจากมิชิแกน ตารางที่ 5.1-5.3 และตารางที่ 5.4-5.6 สรุปแรงที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าที่สภาวะใช้งานทั้งในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวสายส่งโดยข้อกำหนด UWO โดยวิธีละเอียดสำหรับแหล่งลมภาคใต้ของประเทศไทย และข้อมูลลมจากมิชิแกน ตามลำดับ โดยแบ่งช่วงการพิจารณาหน่วยแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งดังแสดงในรูปที่ 5.2 สำหรับข้อกำหนด กฟผ ได้แสดงลมที่กระทำต่อเสาส่งในตำแหน่งจุดยึดต่าง ๆ ตามข้อกำหนด กฟผ ดังแสดงในภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์เสาส่งไฟฟ้า DA1 ตามข้อกำหนดของ กฟผ และข้อกำหนด UWO ซึ่งวิเคราะห์โดยวีธีไฟไนต์อีลีเมนต์ โดยใช้โปรแกรม SAP90 ได้แรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 จากตารางพบว่าที่สภาวะประลัย อัตราส่วนของผลลัพธ์จากข้อกำหนดทั้งสองในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวสายส่งมีความสอดคล้องกัน เป็นที่สังเกตว่าแรงเฉือนที่ฐานโดยข้อกำหนด UWO โดยวิธีละเอียดมีค่ามากกว่าข้อกำหนดของ กฟผ ไม่มากประมาณ 8% เท่านั้น ในขณะที่โมเมนต์ที่ฐานจากข้อกำหนด UWO และข้อกำหนด กฟผ จะต่างกันมากกว่าคือ 10%-30% ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลักๆดังนี้

ก. รูปแบบของหน่วยแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งกล่าวคือ ข้อกำหนดของ กฟผ ใช้หน่วยแรงลมที่คงที่ตลอดความสูง โดยเป็นหน่วยแรงลมที่พิจารณาที่ระดับความสูงเฉลี่ยของเสาส่ง ส่วนข้อกำหนด UWO ใช้หน่วยแรงลมที่แปรเปลี่ยนมากขึ้นตามความสูงตามกฎยกกำลัง ดังแสดงในรูป 3.1และ 3.2 ผลของแรงลมที่มากขึ้นตามความสูงทำให้โมเมนต์ที่ฐานซึ่งคำนวณจากข้อกำหนด UWO มีค่าสูงขึ้นกว่าข้อกำหนดของ กฟผ

ข. ตัวคูณรูปร่างที่แตกต่างกันคือ ข้อกำหนดของ กฟผ ใช้ค่าตัวคูณรูปร่างรวมตลอดทั้งโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าคือ 2.9 ส่วนข้อกำหนด UWO แบ่งการพิจารณาเป็นช่วงๆ ตามสัดส่วนความทึบของเสาส่งไฟฟ้าซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.00-3.63

ค. ตัวคูณผลด้านพลศาสตร์ ข้อกำหนดของ กฟผ คิดผลของพลศาสตร์โดยการแปลงความเร็วลมเฉลี่ยใน 10 นาที เป็นความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 2 วินาที โดยการคูณแฟคเตอร์กระโชก 1.3 ซึ่งเทียบได้กับการใช้ค่าตัวคูณผลทางด้านพลศาสตร์เท่ากับ 1.83 เมื่อคิดที่ความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ส่วนข้อกำหนด UWO มีค่าเท่ากับ 1.90 ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งสายส่ง โดยพิจารณาเสาส่งที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.14 เฮิร์ต และความเร็วลมอ้างอิงเท่ากับ 31.7 เมตรต่อวินาที ในสภาพภูมิประเทศโล่ง

ง. ที่สภาวะประลัยข้อกำหนดของ กฟผ ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Overload factor) เท่ากับ 1.30 ส่วนข้อกำหนด UWO ใช้ตัวคูณน้ำหนักเท่ากับ 1.40 ซึ่งได้พิจารณาลดค่าแรงลง 25% สำหรับกรณีแรงลมกระทำร่วมกับน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้นถ่วงของโลกด้วยโดยที่ตัวคูณน้ำหนักส่วนแรงลมใช้ค่า 1.80

สำหรับแรงภายในพบว่าในชิ้นส่วนทแยงข้อกำหนด UWO ให้ค่ามากกว่าข้อกำหนด กฟผ ประมาณ 13% ทั้งสองทิศทาง ส่วนชิ้นส่วนหลักต่างกันพอสมควรคือ ข้อกำหนด UWO จะให้ค่ามากกว่าข้อกำหนด กฟผ ประมาณ 50% ในทิศทางตั้งฉาก และประมาณ 15% ในทิศทางขนานกับแนวสายส่ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีแพตช์โหลดกับวิธีละเอียดตามข้อกำหนด UWO พบว่าทั้งแรงภายใน,แรงเฉือน และโมเมนต์ที่ฐานจากวิธีแพตช์โหลดจะให้ค่าที่มากว่า วิธีละเอียด

ประมาณ 10-15% แสดงว่าผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์ (Uncorrelated gusts) มีผลต่อเสาส่งกรณีศึกษาไม่มากนัก

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิตย์ศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตดังแสดงในตารางที่ 5.9 สำหรับสภาวะใช้งาน พบว่าแรงภายในที่เกิดขึ้นในบางชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 5% เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น เมื่อตรวจสอบระยะการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้าง (Lateral displacement) พบว่ามีค่าน้อยมากคือประมาณ 0.20 เมตร ที่ปลายเสาส่งหรือประมาณ 1/233 ของความสูงเสาส่งไฟฟ้า จึงทำให้สติฟเนสรวมของโครงสร้างจากการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นมีค่าแตกต่างน้อยมากกับสติฟเนสแบบเชิงเส้น จึงส่งผลให้ผลของความไม่เชิงเส้นมีค่าไม่มากนัก

5.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาส่วนต่างๆ ดังนี้

5.2.1 ความถี่ธรรมชาติ

โครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าจะถูกจำลองในลักษณะคานยื่นโดยมีมวลรวม (Lumped mass) ที่จุดต่าง ๆ 7 จุดดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าเสาส่งไฟฟ้ามีความถี่ธรรมชาติสำหรับโหมดแรกใกล้เคียงกันมากคือ 2.1 เฮิร์ต ในทิศทางตั้งฉากและทิศทางขนานกับแนวสายส่ง ส่วนความถี่ธรรมชาติในโหมดอื่น ๆ จะแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.10 รูปที่ 5.4 แสดงรูปร่างของโหมดที่ 1 ถึง 4 ในทิศทางตั้งฉากกับสายส่ง

5.2.2 การตรวจสอบผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์โครงสร้าง การตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้เป็นสิ่งสำคัญเพื่อประกันความถูกต้องของการวิเคราะห์ สำหรับระบบพลศาสตร์สิ่งที่ต้องตรวจสอบคือ ผลลัพธ์ของระบบแรงที่กระทำกับโครงสร้างต้องเท่ากับผลคูณของมวลกับอัตราเร่งตามกฎข้อที่สองของนิวตัน เนื่องจากระบบโครงสร้างที่ศึกษานี้สลับซับซ้อนมากจึงเลือกตรวจสอบที่บางจุด และเพื่อให้ง่ายขึ้นจะพิจารณาที่บางขณะเวลาที่ระบบมีอัตราเร่งเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากสัมประสิทธ์ความหน่วงมีค่าน้อยมาก แรงจาก

ความหน่วงก็จะมีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นแรงภายนอกควรจะใกล้เคียงกับแรงต้านทานอีลาสติกหรือแรงเฉือนที่ฐาน ในการวิจัยได้พิจารณาแรงลมที่กระทำต่อเสาส่ง และแรงเฉือนที่ฐานดังแสดงในรูปที่ 5.6 และพิจารณาที่เวลา 8.6 วินาที หรือ 9.1 วินาที ซึ่งมีความเร่งเข้าใกล้ศูนย์ พบว่าความแตกต่างระหว่างแรงภายนอก และแรงเฉือนประมาณ 5% ซึ่งแตกต่างกันไม่มาก ผลที่ต่างกันเนื่องจากแรงจากความหน่วงและแรงเฉื่อย ซึ่งไม่เป็นศูนย์ทีเดียว (อัตราเร่งยังคงมีค่าเล็กน้อย) ซึ่งเมื่อรวมผลของความหน่วงแล้วก็จะพบว่าระบบแรงกับอัตราเร่งเป็นไปตามกฎของนิวตัน

5.2.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้ลมจากมิชิแกน, 1931

รูปแบบและขนาดของแรงเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลาตามข้อกำหนด UWO ซึ่งแปลงมาจากความเร็วลม 14 เมตรต่อวินาที เฉลี่ยใน 20 วินาที (ซึ่งเทียบเท่ากับความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที เฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง) แสดงในตารางที่ 5.11 สำหรับการแปรเปลี่ยนตามเวลาของแรงดันลมนั้นกระทำได้โดยนำฟังก์ชันของเวลา $\left(V(t)/\overline{V}\right)^2$ คูณแรงดันลมเฉลี่ย ซึ่งในงานวิจัยใช้ฟังก์ชันของเวลาที่แตกต่างกัน 3 ฟังก์ชัน (ดูรูปที่ 5.5ก) กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า ตารางที่ 5.12ก - 5.12ข แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จากข้อมูลข้างต้นกับการวิเคราะห์ทางสถิตย์ศาสตร์ตามข้อกำหนด UWO ซึ่งใช้ความเร็วลมพื้นฐานเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง (ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที) ผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้งในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวสายไฟฟ้าให้อัตราส่วนของผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนทแยงจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะมากกว่าผลทางสถิตย์ศาสตร์โดยเฉลี่ยประมาณ 40% และ 53% ตามลำดับ ส่วนแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานพบว่า ผลทางพลศาสตร์มากกว่าผลทางสถิตย์ศาสตร์โดยเฉลี่ยประมาณ 50% และ 40% ตามลำดับ ผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ความเร็วลมพื้นฐานที่แตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้จาก ค่าแรงเฉลี่ยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์จะสูงกว่าแรงเฉลี่ยจากการวิเคราะห์สถิตย์ศาสตร์ตามข้อกำหนด UWO ดังนั้นในการพิจารณาผลกระโชกของลม จึงพิจารณาความเร็วลมพื้นฐานที่เท่ากัน คือ 14 เมตรต่อวินาที ที่ความสูง 10 เมตร ตารางที่ 5.12ค และตารางที่ 5.12ง แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วลมพื้นฐานที่เท่ากัน ผลการวิเคราะห์โดยวิธีละเอียดให้ค่าตัวคูณพลศาสตร์ C_{dyn} เท่ากับ 1.80 ซึ่งพิจารณาจากความเร็วลมพื้นฐานข้างต้น ส่วนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ให้ค่าตัวคูณพลศาสตร์ C_{dyn} เท่ากับ 1.40 ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดต่อแรงเฉือนเฉลี่ย

ชิ้นส่วนที่ควรให้ความสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากแรงภายในแตกต่างกันค่อนข้างสูง คือ F2T และ F2L คือประมาณ 94% และ 81% ซึ่งอาจเป็นผลการกระโชกของลมที่ความสูงน้อย ๆ มีค่าค่อนข้างสูงดังแสดงในรูปที่ 5.5ก ตารางที่ 5.13 แสดงผลการเปรียบเทียบทางพลศาสตร์ระหว่างการใช้ฟังก์ชันของแรงจริงซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกัน 3 ฟังก์ชัน กับการใช้ฟังก์ชันเดียวกระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์กัน ในการวิเคราะห์พบว่าหน่วยแรงภายใน , แรงเฉือน และโมเมนต์ที่ฐานมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักคือประมาณ 10%-20% เท่านั้น ทั้งนี้แสดงว่าผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์กันมีผลไม่มากนัก

5.2.4 ผลการวิเคราะห์โดยใช้ลมจากการทดสอบในอุโมงค์ลม

ดังได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.3.2 ว่าผลจากการทดสอบในอุโมงค์ลมได้ลมสอดคล้องกับในสภาพภูมิประเทศแบบชนบท (ดัชนียกกำลังเท่ากับ 0.22) และมีความเร็วลมพื้นฐานเท่ากับ 29 เมตรต่อวินาที เฉลี่ยใน 200 วินาที ซึ่งเทียบเท่ากับ 24 เมตรต่อวินาที เฉลี่ยใน 1 ชั่วโมงเมื่อปรับแก้ด้วยตัวคูณปรับแก้ตามข้อกำหนดUWO ตารางที่ 5.14 แสดงแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งเมื่อวิเคราะห์ทางสถิตย์ศาสตร์ตามข้อกำหนด UWO โดยวิธีละเอียดโดยใช้ความเร็วลมพื้นฐานเท่ากับ 24 เมตรต่อวินาที เฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง สำหรับลมเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ซึ่งพิจารณาจากความเร็วลมพื้นฐานเท่ากับ 29 เมตรต่อวินาที แสดงไว้ในตารางที่ 5.15 ในการวิเคราะห์พลศาสตร์จะใช้แรงลมเฉลี่ยในตารางที่ 5.15 คูณกับฟังก์ชันของเวลาที่แสดงในรูปที่ 5.5ข

ตารางที่ 5.16ก-ข แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลทางพลศาสตร์ และสถิตย์ศาสตร์ตามความเร็วลมพื้นฐานที่กล่าวข้างต้น จากตารางทั้งสองพบว่าผลทางพลศาสตร์มีค่ามาก กล่าวคือ แรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนหลักและชิ้นส่วนทแยงจะมากกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 2.35 เท่า และ 1.72 เท่า ตามลำดับ ส่วนแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานพบว่า ผลทางพลศาสตร์จะมากกว่าผลทางสถิตย์ศาสตร์โดยเฉลี่ยประมาณ 1.70 เท่า และ 2.0 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีผลเนื่องจากการใช้ความเร็วลมพื้นฐานที่แตกต่างดังกล่าวข้างต้น ดังจะอธิบายได้จากรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงผลรวมของแรงลม $F(t)$ ที่กระทำกับเสาส่งกับแรงเฉือนแปรตามเวลาพร้อมค่าแรงเฉลี่ย จะเห็นว่าค่าแรงลมเฉลี่ยและแรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ ซึ่งสูงกว่าแรงลมเฉลี่ยตามข้อกำหนด UWO ประมาณ 48% เมื่อทำการปรับแก้ความเร็วลมพื้นฐานให้มีค่าเท่ากันคือ 29 เมตรต่อวินาที พบว่าแรงลมเฉลี่ยทางพลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 3128 กิโลกรัม และแรงเฉือนเฉลี่ยที่ฐานเท่ากับ 3140 กิโลกรัม โดยที่แรงเฉลี่ยตามข้อกำหนด UWO ทางสถิตย์ศาสตร์มีค่าเท่ากับ 3078 กิโลกรัม จะ

เห็นว่าแรงลมเฉลี่ยทางพลศาสตร์มากกว่าแรงลมเฉลี่ยตามข้อกำหนด 1.5% และแรงลมเฉลี่ยทางพลศาสตร์กับแรงเฉือนเฉลี่ยที่ฐานต่างกันประมาณ 0.5% ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก แสดงว่าผลการวิเคราะห์เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลทางพลศาสตร์โดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงได้ปรับความเร็วลมพื้นฐานให้เท่ากัน เพื่อที่สามารถเปรียบเทียบผลกระโชกของลมในรูปตัวคูณพลศาสตร์ระหว่างการวิเคราะห์ทั้งสอง ตารางที่ 5.16ค-ง แสดงแรงภายในที่เกิดขึ้นจากการใช้ความเร็วลมพื้นฐาน 29 เมตรต่อวินาทีที่เท่ากัน ในการวิเคราะห์พบว่าตัวคูณพลศาสตร์จากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดต่อแรงเฉือนเฉลี่ยที่ฐาน ส่วนข้อกำหนด UWO ให้ค่าเท่ากับ 2.0 ซึ่งผลการกระโชกจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์มากกว่าข้อกำหนด UWO ประมาณ 70% เนื่องจากสาเหตุหลัก ๆ คือ

ก) ลักษณะการจำลองลมในอุโมงค์ลมอาจจะคลาดเคลื่อนจากสภาพลมตามธรรมชาติ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.7 พบว่าเส้นสเปกตรัมในงานวิจัยย้าย (Shift) ไปด้านความถี่สูงเมื่อเทียบกับสเปกตรัมพลังงานของ Melbourne (1982) ทำให้ค่าความถี่ที่จุดสูงสุดใกล้กับความถี่ธรรมชาติของเสาส่งมากยิ่งขึ้น ยังผลให้โครงสร้างเสาส่งมีการตอบสนองต่อแรงลมสูงขึ้น

ข) งานวิจัยนี้พิจารณาค่าการตอบสนองสูงสุดจากบันทึกความเร็วลม (Wind speed record) หนึ่งเหตุการณ์ แต่ในทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้สร้างข้อกำหนด UWO ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นซึ่งพิจารณาใช้ค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดจากตัวอย่างของบันทึกความเร็วลมจำนวนมาก

สำหรับผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์ โดยเปรียบเทียบทางพลศาสตร์ระหว่างการใช้ฟังก์ชันของแรงจริงซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกัน 3 ฟังก์ชัน กับการใช้ฟังก์ชันเดียวกระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.17 จะเห็นว่าหน่วยแรงภายใน, แรงเฉือน และโมเมนต์ที่ฐานมีค่าแตกต่างกันประมาณ 10-30% แสดงว่าผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์กันมีผลพอสมควร

ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ได้เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์เฉพาะโหมดแรกกับการวิเคราะห์แบบรวมโหมด ในชิ้นส่วนทแยงจากการวิเคราะห์แบบรวมโหมดพบว่าแรงภายในจะสูงกว่าการวิเคราะห์เฉพาะโหมดแรกประมาณ 3-10 เท่า ส่วนในชิ้นส่วนหลักการวิเคราะห์แบบรวมโหมดจะสูงกว่าประมาณ 10-30% ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของเสาสายส่งไฟฟ้าที่ต้านแรงลมจำเป็นจะต้องพิจารณาโหมดที่ 2 รวมไปด้วย