บทที่ 3

ข้อกำหนดที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ใช้แนวทางในการออกแบบตามข้อแนะนำของคณะกรรมการ IEEE (1977) โดยที่สมมุติหน่วยแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ตลอดความสูงดังแสดงในรูปที่ 3.1 หน่วยแรงลมนี้คิดจากหน่วยแรงลมที่ระดับเฉลี่ยของเสาส่งไฟฟ้า ซึ่งจะอยู่ที่ระดับกึ่งกลางของโครงสร้าง ในการคำนวณหน่วยแรงลมนั้นได้ใช้ค่าความเร็วลมอ้างอิงเฉลี่ย 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร ในสภาพภูมิประเทศโล่ง คิดที่คาบการกลับ (Return period) 50 ปี แปลงไปเป็นความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับกึ่งกลางของเสาส่งไฟฟ้า โดยกฎการยกกำลัง (Power law) และใช้ดัชนียกกำลังเท่ากับ 1/7 และแรงลมที่กระทำกับเสาส่งไฟฟ้า ได้คิดผลทางด้านพลศาสตร์โดยใช้แฟคเตอร์กระโชก (Gust factor) เท่ากับ 1.3 ในการการแปลงค่าความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ไปเป็นความเร็วลมเฉลี่ย 2 วินาที

3.1.1 ความเร็วลมอ้างอิง (Reference Wind Velocity)

ความเร็วลมอ้างอิงที่ใช้เป็นความเร็วลมเฉลี่ยที่ 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นที่ผิวโล่ง ในการคำนวณค่าความเร็วลมที่คาบการกลับใด ๆ กฟผ.ได้ใช้สถิติความเร็วลมที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศในช่วง พ.ศ. 2494-2523 โดยสมมุติว่าค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยในเวลา 10 นาที จากนั้นจะทำการประมาณค่าความเร็วลมที่คาบการกลับ 50 ปี โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามสมการ 3.1

ความเร็วลมที่คาบการกลับ t ปี คือ

$$V_t = V + \sigma K_t \qquad (3.1)$$

โดยที่ V_t คือ ความเร็วลมอ้างอิงที่คาบการกลับ t ปี ที่ความสูง 10 เมตร

V คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี ที่ความสูง 10 เมตร

σ คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี

K_t คือ ค่าคงที่สำหรับคาบการกลับ t ปี เมื่อคิดจากสถิติ t_0 ปี ดังที่ให้ในตาราง (3.1)

เราสามารถหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงใด ๆ (Z) จากความเร็วลมอ้างอิง ได้โดยใช้กฎการยกกำลัง (Davenport, 1965) ดังนี้

$$V_Z = V_{ref}\left(\frac{Z}{10}\right)^{\alpha} \qquad (3.2)$$

โดยที่ V_Z คือ ความเร็วลมที่ความสูง Z ใดๆ

V_{ref} คือ ความเร็วลมอ้างอิง ที่ความสูง 10 เมตร

α คือ ดัชนียกกำลัง ในที่นี้ใช้ค่าเท่ากับ 1/7 สำหรับพื้นที่โล่ง

3.1.2 หน่วยแรงดันลม

มวลอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (V) จะทำให้เกิดหน่วยแรงดันลม $(\bar{q})$ กระทำต่อโครงสร้างตามสภาพพื้นผิวที่โครงสร้างนั้นตั้งอยู่ ซึ่งหาได้สมการ

$$\bar{q} = \frac{1}{2}\rho_a\left(\overline{V}\right)^2 \qquad (3.3)$$

โดยที่ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศมีค่าประมาณ 1.225 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร

$\overline{V}$ คือ ความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้าง สำหรับเสาส่งไฟฟ้ามีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 1/2 ของความสูงทั้งหมด ส่วนสายไฟฟ้ามีความสูงเฉลี่ยเท่ากับความสูงที่ระดับติดตั้งสายไฟฟ้าลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้าง (Sag)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าและสายไฟฟ้า (F) คือ

$$F = \bar{q} C_D A \qquad (3.4)$$

โดยที่ F คือ แรงที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า

C_D คือ ตัวคูณผลรูปร่าง (Shape factor)

A คือ พื้นที่รับแรงลมของโครงสร้าง ในกรณีของเสาส่งไฟฟ้าให้คิดพื้นที่หน้าเดียว โดยที่ผลของแรงลมที่ปะทะพื้นที่ชิ้นส่วนด้านท้ายจะแฝงอยู่ในค่าสัมประสิทธิ์ C_D ส่วนสายไฟฟ้าให้คิดพื้นที่รับลมบนสายไฟฟ้าทั้ง 2 ข้าง

3.1.3 ตัวคูณผลรูปร่าง (C_D)

ตัวคูณผลรูปร่างเป็นสัดส่วนของแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับค่าหน่วยแรงดันลม ตัวคูณนี้ขึ้นกับลักษณะรูปร่างของโครงสร้าง ในข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนดให้ตัวคูณรูปร่างของสายไฟฟ้ามีค่า 1.0 และตัวคูณผลรูปร่างของเสาส่งไฟฟ้ารวมเท่ากับ 2.9 ซึ่งได้จากการแทนค่าสัดส่วนความทึบ (Solidity ratio, ϕ) เท่ากับ 0.23 ในสมการที่ ที่กำหนดใน ANSI A58.1 (American National Standards Institute,1981)

$$C_D = 4.13 - 5.18\phi \qquad (3.5)$$

3.1.4 สภาพการรับน้ำหนัก (Load Condition)

ในข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้พิจารณาสภาวะของแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า 3 สภาวะคือ

ก. สภาวะลมแรง (High wind) ความเร็วที่วิเคราะห์เป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร และมีคาบการกลับ 50 ปี โดยสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาคือ

1. สภาวะแรงลมกระทำในทิศทางตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า (Transverse direction)

2. สภาวะแรงลมกระทำในทิศทางขนานแนวสายไฟฟ้า (Longitudinal direction)

3. สภาวะแรงลมกระทำในทิศทางทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า (Yawed ψ direction) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถแตกเป็นแรงประกอบ 2 ส่วนคือ แรงประกอบตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า (Transverse component, TF) และแรงประกอบขนานกับแนวสายไฟฟ้า (Longitudinal component, LF) ดังแสดงในสมการคือ

แรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า

$$TF = q_t C_D A_T \cos\psi \qquad (3.6)$$

$$LF = q_t C_D A_L \sin\psi \qquad (3.7)$$

โดยที่ q_t คือ หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้า

A_T คือ พื้น ที่รับลมหน้าเดียวของเสาส่งในทิศตั้งฉากกับสายส่ง

A_L คือ พื้นที่รับลมหน้าเดียวของเสาส่งในทิศขนานกับสายส่ง

ส่วนแรงลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า มีเฉพาะส่วนประกอบในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้าเท่านั้นคือ

$$F_c = q_c A \cos^2\psi \qquad (3.8)$$

โดยที่ F_c คือ แรงลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า

q_c คือ หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า

ψ คือ มุมที่กระทำกับแนวตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า

ข. สภาวะลมปานกลาง (Medium wind) ความเร็วลมที่วิเคราะห์เป็นความเร็วเฉลี่ยใน 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร และมีคาบการกลับ 10 ปี และมีสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาคือ

1. กรณีสายไฟขาด (Broken wires) ในกรณีนี้ให้คิดในสภาวะลมปานกลาง

กระทำในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า รวมกับแรงในทิศทางขนานสายไฟฟ้าที่ขาดสมดุล (Unbalanced longitudinal Load) เนื่องจากสายไฟฟ้าขาด และคูณกับ 100% สำหรับเสาส่งแบบรั้ง และ 75% สำหรับส่งแบบแขวน

2. กรณีสายฉนวนขาด (Broken insulator string) พิจารณาที่สภาวะลมปานกลางกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า โดยมีสายไฟฟ้าทั้งหมดขึงอยู่ นอกจากนี้ให้คิดแรงเพิ่มเติมตรงตำแหน่งที่สายฉนวนขาด คือ

ก. น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง (น้ำหนักของสายไฟฟ้าทั้งหมด)

ข. แรง 30 % ของแรงดึงในสายไฟฟ้าในทิศขนานกับสายไฟฟ้า

ค. แรงในทิศตั้งฉากสายไฟฟ้าเท่ากับ 50% ของแรงลมที่กระทำบนสายส่ง

ค. สภาวะลมที่เกิดขึ้นบ่อยๆ (Most frequent wind) พิจารณาให้แรงลมกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า โดยมีสายไฟฟ้าทั้งหมดขึงอยู่ โดยใช้หน่วยแรงดันลมประมาณ 20 kg/m^2 สำหรับสายไฟฟ้า และ 31 kg/m^2 สำหรับเสาส่ง รวมกับแรงในแนวดิ่งคือ

1. 100 กิโลกรัม ตรงตำแหน่งที่ติดตั้งสายป้องกันฟ้าผ่า
2. 400 กิโลกรัม ตรงตำแหน่งที่ติดตั้งสายไฟฟ้าในเสาส่งแขวน
3. 600 กิโลกรัม ตรงตำแหน่งที่ติดตั้งสายไฟฟ้าในเสาส่งรั้ง

ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ยังมีการใช้คูณน้ำหนักบรรทุก (Overload factor) ซึ่งเป็นการคำนึงถึงความไม่แน่นอนในการเก็บสถิติของข้อมูลความเร็วลม และความไม่สมบูรณ์เล็กน้อย (Minor imperfections) ในการก่อสร้างดังต่อไปนี้ สภาวะแรงลมกระทำในทิศทางตั้งฉาก, ทิศทางขนานและทิศทางทำมุม ψ กับแนวสายส่งไฟฟ้ารวมทั้งกรณีบำรุงรักษา ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก เท่ากับ 1.30 ส่วนในกรณีสายไฟขาดหรือสายฉนวนขาด ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.10

3.2 ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา

Davenport,Ho และ Surry ได้เสนอข้อกำหนดใหม่ในการกำหนดลักษณะของการคิดรูปแบบของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าในปี ค.ศ 1995 โดยใช้พื้นฐานจากคู่มือหมายเลข 74 ของสมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งอเมริกา (American Society of Civil Engineers, 1991)

รูปแบบหน่วยแรงลมที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าใกล้เคียงสภาพจริงของลมมากขึ้นคือ มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สภาวะลมที่พิจารณาเป็นสภาวะลมแรงคือคิดที่คาบการกลับ 50 ปี ความเร็วลมพื้นฐานเป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมงที่ความสูง 10 เมตร โดยมีการคำนึงถึงทิศทางของลมและเขตที่มีโอกาศเกิดพายุหรือไม่ ส่วนผลทางพลศาสตร์มีการคำนึงถึงรูปร่างของโครงสร้างและความเร็วลมพื้นฐาน ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

3.2.1 หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างจะเทียบเท่าเป็นหน่วยแรงลมสถิตย์โดยกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนของโครงสร้าง โดยแสดงเป็นสมการทั่วไปคือ

$$W = q_{ref} C_{\exp} C_{shp} C_{dyn} \qquad (3.9)$$

โดยที่ W คือ หน่วยแรงลม ที่กระทำต่อโครงสร้าง (Wind forces per unit area)

q_{ref} คือ หน่วยแรงดันลมอ้างอิง (Reference velocity pressure)

$C_{\exp}$ คือ ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (Exposure factor)

C_{shp} คือ ตัวคูณผลรูปร่างทางอากาศพลศาสตร์(Aerodynamic shape factor)

C_{dyn} คือ ตัวคูณผลทางพลศาสตร์ (Dynamic response factor)

3.2.2 หน่วยแรงดันลมอ้างอิง (Reference Velocity Pressure)

หน่วยแรงดันลมอ้างอิงเนื่องมาจากความเร็วลมพื้นฐาน ดังสูตรต่อไปนี้

$$q_{ref} = \frac{1}{2}\rho_a V_{ref}^2 \qquad (3.10)$$

โดยที่ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ

V_{ref} คือ ความเร็วลมอ้างอิง ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ที่ความสูง10 เมตร ในสภาพพื้นผิวโล่งโดยคิดที่คาบการกลับ 50 ปี

สำหรับหน่วยแรงดันลมที่ได้มาจากความสูงระดับและในสภาพพื้นผิวแบบอื่นๆ ก็สามารถแปลงกลับ ให้เป็นหน่วยแรงดันลมอ้างอิงได้ดังนี้

$$q_{ref} = 0.39q\left(\frac{Z_G}{Z}\right)^{2\alpha} \qquad (3.11)$$

โดยที่ q คือ หน่วยแรงดันลมที่ระดับความสูง Z

Z_G คือ ความสูงเกรเดียนต์ ตามสภาพพื้นผิวของภูมิประเทศ

α คือ ดัชนียกกำลังตามสภาพพื้นผิวของภูมิประเทศ

ความสูงเกรเดียนต์และดัชนียกกำลังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 สำหรับหน่วยแรงดันลมที่ความสูง 10 เมตรในสภาพพื้นผิวโล่ง แต่ไม่ใช่ที่ค่าเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง หรือคาบการกลับไม่เท่ากับ 50 ปี สามารถปรับแก้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

หน่วยแรงดันอ้างอิงที่คำนวณจากความเร็วลมพื้นฐานที่กล่าวข้างต้น เป็นการพิจารณาลมในทิศทางใด ๆ เทียบกับจุดที่พิจารณา สำหรับการวิเคราะห์เสาส่งไฟฟ้ามีการพิจารณาแรงลมกระทำต่อเสาส่งในทิศทางต่าง ๆ โดยเทียบกับทิศทางตั้งฉากกับแนวสายส่งเป็นหลัก ดังนั้นหน่วยแรงดันลมจึงมีการคำนึงทิศทางของลม (Wind direction) ด้วย โดยมีตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 พร้อมทั้งพิจารณาสภาพของลม เช่นพายุใต้ฝุ่นหรือลมทั่วไปเป็นต้น

3.2.3 ตัวคูณสภาพพื้นผิว (C_{exp})

ตัวคูณสภาพผิวเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสูงและสภาพพื้นผิวภูมิประเทศ โดยที่สภาพพื้นผิวจะแสดงอยู่ในรูปของความขรุขระของพื้นผิว (Terrain roughness) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การกระจายความดันลมแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ของกฎการยกกำลังดังนี้

$$C_{exp}(Z) = B\left(\frac{Z}{10}\right)^{2\alpha} \qquad (3.12)$$

โดยที่ $C_{exp}(Z)$ คือ ตัวคูณสภาพพื้นผิว

B คือ สเกลแฟคเตอร์

α คือ ดัชนียกกำลัง

ค่าสเกลแฟคเตอร์และดัชนียกกำลังจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศที่โครงสร้างติดตั้งอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

3.2.4 ตัวคูณรูปร่างทางอากาศพลศาสตร์ $\left(C_{shp}\right)$

ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตและรูปร่างของโครงสร้าง และเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลม สำหรับการหาค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนโครงสร้างสามมิติ อาจทำได้โดยการทดสอบโดยใช้แบบจำลองในอุโมงค์ลม หรือใช้ผลการทดลองจากอุโมงค์ลมของชิ้นส่วนโครงสร้างรูปร่างต่างๆ โดยต้องคิดผลของการกำบัง (Shielding effects) ของชิ้นส่วนด้านหน้าที่มีต่อชิ้นส่วนด้านหลังด้วย แต่การหาค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนเสาสายส่งโดยวิธีหลังนี้ค่อนข้างยุ่งยาก ข้อกำหนดดังกล่าวจึงได้เสนอวิธีใช้ค่าตัวคูณผลรูปร่างรวม (Overall shape factor, C^*_{shp})แทนสำหรับเสาโครงถัก (Lattice tower) ซึ่งมีที่มาจาก American Sociery of Civil Engineers (1991) ค่าตัวคูณผลรูปร่างรวมขึ้นกับค่าสัดส่วนความทึบของพื้นที่หน้าเสาโครงถักดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 สำหรับการคิดค่า C^*_{shp} ในทิศทางตั้งฉากกับแนวสายไฟในส่วนแขนของเสาสายส่ง (Tower arms) ให้ใช้ค่าสัดส่วนความทึบเป็นหนึ่ง

3.2.5 ตัวคูณผลพลศาสตร์ $\left(C_{dyn}\right)$

ตัวคูณผลพลศาสตร์เป็นอัตราส่วนของผลสูงสุด (Maximum effect) ต่อผลเฉลี่ยเนื่องจากแรงลม ตัวคูณพลศาสตร์เป็นค่าแฟคเตอร์ที่คำนึงถึงผลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลมที่ผ่านวัตถุที่ไม่โค้งมน ซึ่งรวมผลของเวค (Wake) และจากลมวนสลับ (Vortex shedding)

ข. ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลมเนื่องจากลมกระโชก กระทำในช่วงเวลาสั้นกว่าเวลาเฉลี่ยที่กำหนดสำหรับหน่วยแรงดันลม และกระทำบนบางส่วนหรือทั้งหมดของโครงสร้าง

ค. ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลมที่เกิดขึ้นจากการสั่นไหวของโครงสร้างเมื่อถูกลมพัด การสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงลมสามารถทำให้เกิดแรงอากาศพลศาสตร์ ซึ่งอาจจะมีทิศทางเสริมหรือตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับค่าความหน่วงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic damping)

ง. แรงเฉื่อยที่ถูกขยายเพิ่มเนื่องจากการเกิดกำทอน (Resonance) ของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนโครงสร้าง

โครงสร้างโดยทั่วไปจะเกิดผลพลศาสตร์ดังกล่าวบ้างไม่มากก็น้อย โดยผลทางพลศาสตร์ทั้งหมดได้จากการรวมผล 2 ส่วน คือส่วนพื้นหลัง (Background component) ซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ (Quasi - statical) โดยปราศจากการขยายเพิ่มทางพลศาสตร์ และส่วนกำทอน (Resonant component) เนื่องจากความถี่ของแรงกระตุ้น (Excitation) ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.6 ดังนั้นผลตอบสนองค่าสูงสุดเนื่องจากแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง, $(\hat{r})$ สามารถเขียนได้ในกรณีทั่ว ๆ ไปดังนี้

$$\hat{r} = \bar{r} + g_r \sigma_r \qquad (3.13)$$

โดยที่ $\bar{r}$ คือ ผลตอบสนองเฉลี่ยเนื่องจากแรงกระทำ (Mean loading effect)

g_r คือ ตัวประกอบสูงสุดทางสถิติ (Statistical peak factor)

σ_r คือ รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผลตอบสนองเนื่องจากแรง (Root mean sqaure loading effect)

เนื่องจากในความหมายของตัวคูณทางพลศาสตร์ เราจะได้

$$C_{dyn} = \frac{\hat{r}}{\bar{r}}$$

$$= 1 + \frac{g_r \sigma_r}{\bar{r}} \quad , \quad \bar{r} \neq 0 \qquad (3.14)$$

ตัวคูณผลทางพลศาสตร์ เป็นการคำนึงถึงผลต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น แต่ข้อกำหนดนี้พิจารณาเฉพาะการกระโชกของลม ซึ่งมักเรียกว่าตัวคูณการตอบสนองลมกระโชก (Gust response factor) โดยจะคำนึงทั้งลักษณะความถี่ธรรมชาติ (Frequency response characteristics) ของโครงสร้าง และลักษณะของลมกระโชกรวมถึงสภาพภูมิประเทศและมิติต่างๆ ที่ใช้จำกัดความเพื่อหาค่าตัวคูณพลศาสตร์แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 สามารถแสดงได้ดังนี้ (Davenport ,1979)

สำหรับเสาส่งไฟฟ้า

$$C_{dyn} = 1 + \frac{1}{\sqrt{C_{\exp}(h_t)}} \sqrt{B_t + R_t} \qquad (3.15)$$

$$B_t = \frac{1}{1 + 0.375 \frac{h}{L_s}} \qquad (3.16)$$

$$R_t = 0.0123 \left(\frac{f_t h_t}{\bar{V}_{ht}} \right)^{\frac{-5}{3}} \frac{1}{\zeta_t} \qquad (3.17)$$

โดยที่ h_t คือ ความสูงประสิทธิผลประมาณ 2/3 ของความสูงทั้งหมด

B_t คือ ส่วนของผลพื้นหลังของเสาสายส่งซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ที่ความถี่ต่ำกว่ากับความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง , f_t

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

R_t คือ ส่วนของผลกำทอนของเสาสายส่งที่ความถี่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง

h คือ ความสูงทั้งหมดของเสาส่งไฟฟ้า (เมตร)

L_s คือ สเกลอินทิกรัลทางขวางการแปรปรวน (Transverse integral scale of turbulence) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 65 เมตร

f_t คือ ความถี่ธรรมชาติของเสาส่งไฟฟ้า (H_z) อาจจะประมาณ คือ 100/h สำหรับเสาโครงถัก (Lattice towers)

$\overline{V}_{h_t}$ คือ ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผล

ζ_t คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ของเสาส่งไฟฟ้ามีค่าประมาณ 1% ถึง 2%ของความหน่วงวิกฤติ

สำหรับสายไฟฟ้า

$$C_{dyn} = 1 + \frac{1}{\sqrt{C_{\exp}(h_c)}}\sqrt{B_c + R_c} \qquad (3.18)$$

$$B_c = \frac{1}{1 + 0.8\frac{L}{L_s}} \qquad (3.19)$$

$$R_c = 0.0113\left(\frac{f_c h_c}{\overline{V}_{h_c}}\right)^{-\frac{3}{5}} \frac{h_c}{L}\frac{1}{\zeta_c} \qquad (3.20)$$

โดยที่ h_c คือ ความสูงประสิทธิผลสายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับความสูงที่ระดับติดตั้งสายไฟฟ้าลบด้วย2/3 ของระยะตกท้องช้าง (Sag)

L คือ ความยาวระหว่างเสาส่ง

f_c คือ ความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้าอาจจะประมาณ $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3g}{2sag}}$ เฮิรตซ์

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

sag คือ ระยะตกท้องช้าง $\frac{wL^2}{8T}$

w คือ น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า

T คือ แรงดึงในสายไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\overline{V_{h_c}}$ คือ ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของสายไฟฟ้า

ζ_c คือ อัตราส่วนความหน่วงของสายไฟฟ้า (Damping ratio) มีค่าประมาณ

$$\left(\frac{\rho_a d^2}{m}\right)\left(\frac{V_{h_c}}{f_c d}\right)\frac{1.2}{4\pi}$$

m คือ มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของสายส่ง

3.2.6 สภาพการรับน้ำหนัก

ข้อกำหนด UWO พิจารณาเฉพาะสภาวะลมแรงเท่านั้น โดยที่ในการคำนวณจะต้องคำนึงถึง 3 สภาวะคือ

ก. สภาวะแรงลมกระทำกับโครงสร้างในทิศทางตั้งฉากกับแนวสาย

ข. สภาวะแรงลมกระทำกับโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวสาย ในกรณีนี้ถือว่าแรงลมกระทำต่อสายไฟฟ้าเป็นศูนย์

ค. สภาวะแรงลมกระทำในทิศทางทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า (Yawed ψ direction) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในกรณีนี้หาแรงลัพธ์ที่กระทำกับโครงสร้างได้จากแรงประกอบ 2 ส่วนคือ แรงประกอบตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า (Transverse component) และแรงประกอบขนานกับแนวสายไฟฟ้า (Longitudinal component) โดยที่แรงลัพธ์กับแรงประกอบมีความสัมพันธ์กันดังนี้

สำหรับเสาส่งไฟฟ้า

$$F=\left(1+0.2\sin^2 2\psi\right)\left(F_t\cos^2\psi+F_l\sin^2\psi\right) \qquad (3.21)$$

ในเมื่อ F คือ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อเสาส่ง

F_l คือ แรงประกอบขนานกับแนวสายไฟฟ้า

F_t คือ แรงประกอบตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า

แรงลัพธ์ที่กระทำต่อเสาส่งไฟฟ้าจากสมการข้างต้น สามารถแตกเป็นแรงย่อยในแนวตั้งฉากและขนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

$$TF = F\cos\psi \qquad (3.22)$$

$$LF = F\sin\psi \qquad (3.23)$$

โดยที่ TF คือ แรงประกอบตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า

LF คือ แรงประกอบขนานกับแนวสายไฟฟ้า

สำหรับสายไฟฟ้าจะมีเฉพาะแรงประกอบในแนวตั้งฉากกับสายไฟฟ้าเท่านั้นคือ

$$F_c = q_{ref} C_{\exp} C_{shp} C_{dyn} A\cos^2\psi \qquad (3.24)$$

3.3 แพตช์โหลด (Patch Loading)

ในอดีตผลของลมทางพลศาสตร์ ถูกประมาณด้วยการเพิ่มค่าเฉลี่ยด้วยค่าคงที่กระโชก (gust factor) เนื่องจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ยังมีความยุ่งยากต้องการเครื่องมือที่มีความละเอียดและถูกต้องสูง ต่อมา Gerstoft (1984) และผู้ร่วมงานได้นำเสนอการใช้ชุดของแรง ซึ่งเรียกว่าแพตช์โหลด (Patch loading) ดังแสดงในรูป 3.8 เพื่อคำนึงถึงผลการกระโชกของลมที่ไม่สัมพันธ์กัน (Uncorrelated gusts) และได้มีการเพิ่มค่าคงที่บางตัว ซึ่งขึ้นกับลักษณะของโครงสร้าง และลักษณะของแรงลม ผลการตอบสนองสูงสุดคือ

$$\hat{r} = \bar{r} + \hat{r}_{PL} \qquad (3.25)$$

โดยที่ $\hat{r}$ คือ ผลการตอบสนองสูงสุด

$\hat{r}_{PL}$ คือ ผลของการกระโชกหรือ ความแปรปรวนของลมซึ่งมาจากชุดของแรง

$\bar{r}$ คือ ผลการตอบสนองเฉลี่ยเนื่องจากแรง

แรงแพตซ์โหลดกระทำเป็นช่วงๆ ของโครงสร้าง และจะกระทำในทิศทางเดียวกันทั้งหมดโดยที่เมื่อนำผลการตอบสนองเนื่องจากการนำชุดของแรงแพตซ์โหลด มารวมกันในรูปแบบที่เหมาะสม พบว่าผลเนื่องจากแพตซ์โหลดจะคล้ายกับส่วนพื้นหลัง (Background component) ของผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ แต่เนื่องจากว่าผลการตอบสนองของส่วนพื้นหลังไม่ได้กระทำเต็มที่ตลอดความสูงของโครงสร้างส่งผลให้การตอบสนองของแพตซ์โหลด หาได้จาก

$$\tilde{r}_{PL} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} r_{PLi}^2} \qquad (3.26)$$

โดยที่ $\tilde{r}_{PL}$ คือ ผลการตอบสนองของแรงแพตซ์โหลดทั้งหมด

r_{PLi} คือ ผลการตอบสนองของแรงแพตซ์โหลดที่ i

n คือ จำนวนชุดของแรงของแรงแพตซ์โหลด

หลังจากนั้นจะต้องปรับด้วยค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากรูปร่างของโครงสร้าง และลักษณะของลม เช่นความเร็วลมเฉลี่ย,ความแปรปรวนเป็นต้น เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับผลทางพลศาสตร์มากขึ้น กล่าวคือ

$$\hat{r}_{PL} = \tilde{r}_{PL}\ \lambda_B\ \lambda_R\ \lambda_{TL}\ g_r \qquad (3.27)$$

โดยที่ λ_B คือ แฟคเตอร์เนื่องจากพื้นที่ส่วนหลังของผลทางด้านพลศาสตร์

λ_R คือ แฟคเตอร์เนื่องจากผลการกำทอนของผลทางด้านพลศาสตร์

λ_{TL} คือ แฟคเตอร์ เนื่องจากความแปรปรวนของลม

g_r คือ ตัวประกอบสูงสุดทางสถิติ

ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทร์นออนตาริโอ ได้เสนอรูปแบบแรงแพตซ์โหลดที่กระทำเสาส่งไฟฟ้าที่โครงถักทั้งแบบไม่มีลวดสปริงยึด และมีลวดสปริงยึด ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

จากสมการที่ 3.15 ผลเฉลี่ยเนื่องจากแรงสามารถหาได้จากหน่วยแรงดันลมเฉลี่ย คือ

I 17212340

$$\overline{W} = q_{ref}\ C_{\exp}\ C_{shp} \qquad (3.28)$$

ส่วนผลเนื่องจากหน่วยแรงแพซต์โหลดที่ i ซึ่งมีการกระจายสม่ำเสมอบนบางช่วงของเสาส่งไฟฟ้าและกระทำในทิศทางบวกคือ

$$W_{PLi} = q_{ref}\ C_{shp}\ C_{\exp}(Z_i)(C_{dyn} - 1) \qquad (3.29)$$

โดยที่ Z_i คือ ตำแหน่งสมดุลสถิตย์ของแพซต์โหลดที่ i

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย