หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ส่วนที่สองจะกล่าวถึงข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา และในส่วนสุดท้าย จะเป็นการเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าทั้งสองวิธี

2.1 ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าที่ใช้อยู่ ซึ่งกำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นข้อกำหนดการออกแบบสายส่ง 230 เควี ประจวบคีรีขันธ์-สุราษฎร์ธานี และสระบุรี2-นครราชสีมา2 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2531) ซึ่งตัวอย่างเสาสายส่งชนิด DA1 ที่ใช้ในกรณีศึกษา ก็เป็นเสาสายส่งในสายดังกล่าว ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีแนวทางจากวิธีการในบทความของ IEEE (1977) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

2.1.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างหรือเสาสายส่งไฟฟ้า อาจพิจารณาเป็นผลคูณของส่วนประกอบต่างๆ ดังสมการ (2.1)

$$F = q C_d A \qquad \text{..... (2.1)}$$

เมื่อ F = แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

q = หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อโครงสร้าง (Wind pressure หรือ Velocity pressure)

C_d = ตัวคูณผลรูปร่าง (Shape factor หรือ Drag coefficient)

A = พื้นที่รับลมของโครงสร้าง สำหรับเสาสายส่งให้คิดพื้นที่รับลมเพียงหน้าเดียว และสำหรับกรณีของสายไฟฟ้า ให้คิดพื้นที่รับลมบนสายไฟฟ้าทั้งสองข้าง

ในส่วนของหน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อโครงสร้าง ให้คิดจากความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้าง ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วลมอ้างอิง (Reference wind velocity) ดังจะกล่าวในภายหลัง ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดันลมกับความเร็วลมเขียนได้ดังนี้

$$q = \frac{1}{2} \rho_a V^2 \qquad \text{..... (2.2)}$$

เมื่อ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (Air density) มีค่าเท่ากับ 1.225 กิโลกรัม(มวล)ต่อลูกบาศก์เมตร

V = ความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้าง

ค่าความเร็วลมอ้างอิง และ ตัวคูณผลรูปร่าง สำหรับโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า จะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.1.1.1 และ 2.1.1.2

2.1.1.1 ความเร็วลมอ้างอิง

ความเร็วลมอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ใช้ความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง (Open terrain) โดยคิดที่คาบการกลับ 50 ปี ซึ่งสภาพความเร็วลมนี้จัดเป็นสภาวะลมแรง (High wind condition) ค่าความเร็วลมดังกล่าวได้จากสถิติความเร็วลมที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศในช่วง 10-30 ปี โดยความเร็วลมที่คิดที่คาบการกลับ 50 ปี สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี (Extreme yearly wind speeds) จากสถิติ t_0 ปีใดๆ (Weiss, 1955) ดังนี้

$$V_t = V_0 + \sigma K_t \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ V_t = ความเร็วลมที่คิดที่คาบการกลับ t ปี

V_0 = ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปีจากสถิติ t_0 ปี

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี

K_t = ค่าคงที่สำหรับคาบการกลับ t ปี เมื่อคิดจากสถิติ t_0 ปี (แสดงไว้ในตารางที่ 2.1)

เมื่อได้ความเร็วลมอ้างอิงแล้ว จะต้องแปลงกลับไปยังความสูงเฉลี่ยของโครงสร้างโดยใช้กฎการยกกำลัง (Power law), (Davenport, 1965)

$$V = V_{ref}\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha} \quad \text{..... (2.4)}$$

เมื่อ V = ความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้าง

V_{ref} = ความเร็วลมอ้างอิง คิดที่ความสูง 10 เมตร

h = ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้างที่พิจารณา

α = ดัชนียกกำลัง ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ สำหรับพื้นผิวโล่งให้ใช้ค่า α เท่ากับ 1/7

โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือเสาสายส่งและสายไฟฟ้า ในการหาความเร็วลมก็เช่นกัน จะแบ่งเป็นความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง (V_t) และความเร็วลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า (V_c) ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$V_t = V_{ref}\left(\frac{h_t}{10}\right)^{\alpha} C_g \quad \text{..... (2.5)}$$

เมื่อ V_t = ความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง

h_t = ความสูงเฉลี่ยของเสาสายส่ง มีค่าเท่ากับ 1/2 ของความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง

C_g = ตัวคูณผลกระโชก (Gust factor) ใช้เปลี่ยนค่าความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที เป็นความเร็วลมที่ 2 วินาที ในที่นี้ให้ C_g เท่ากับ 1.3

และ $$V_c = V_{ref}\left(\frac{h_c}{10}\right)^{\alpha} \quad \text{..... (2.6)}$$

เมื่อ V_c = ความเร็วลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า

h_c = ความสูงเฉลี่ยของสายไฟฟ้า มีค่าเท่ากับความสูงที่ระดับที่ติดตั้งสายไฟฟ้า ลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้าง (Sag)

ค่า V_t และ V_c ในสมการที่ (2.5) และ (2.6) เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (2.2) จะได้หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง (q_t) และหน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า (q_c) ตามลำดับ

2.1.1.2 ตัวคูณผลรูปร่าง

ตัวคูณผลรูปร่างเป็นสัดส่วนของแรงลมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับค่าหน่วยแรงดันลม ขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิต และรูปร่างของโครงสร้าง ในข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย[7] กำหนดให้ตัวคูณผลรูปร่างของสายไฟฟ้ามีค่า 1.0 และตัวคูณผลรูปร่างของเสาสายส่งให้ใช้ค่า 2.9 ซึ่งได้จากค่าสัดส่วนความทึบ (Solidity ratio, ϕ) 0.23 แทนลงในสูตร $4.13-5.18\phi$ ที่กำหนดใน ANSI A58.1 (American National Standards Institute, 1981)

2.1.2 สภาพรับน้ำหนัก

การวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้พิจารณาโครงสร้างเสาสายส่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (Gravity load) และสภาพรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ดังนี้

ก) สภาวะลมแรงกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า (Transverse direction) พิจารณาแรงกระทำกับเสาสายส่งและสายไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.1) นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัว

คูณน้ำหนักบรรทุก (Overload factor) เท่ากับ 1.3 ซึ่งคูณเพิ่มมาเพื่อคำนึงถึงความไม่แน่นอนในการเก็บสถิติความเร็วลม และการประมาณในการวิเคราะห์และออกแบบเสาสายส่ง อีกทั้งความไม่สมบูรณ์เล็กน้อย (Minor imperfections) ในการก่อสร้าง โดยตัวคูณน้ำหนักบรรทุกนี้ใช้คูณทั้งแรงลม และน้ำหนักบรรทุกคงที่จากแรงโน้มถ่วง

ข) สภาวะลมแรงกระทำในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า (Longitudinal direction) จะมีแรงกระทำกับเสาสายส่งเช่นเดียวกับกรณีที่แรงลมกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า และไม่มีแรงกระทำกับสายไฟฟ้า กรณีนี้ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.3

ค) สภาวะลมแรงกระทำในทิศทางทำมุม ψ กับเส้นตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า(Yawed ψ direction) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะมีแรงลมกระทำกับเสาสายส่งและสายไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบ คือ ส่วนประกอบแรงในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า TF (Transverse component) และส่วนประกอบแรงในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า LF (Longitudinal component) ซึ่งในส่วนหลังนี้ไม่คิดแรงลมที่กระทำกับสายไฟฟ้า ส่วนประกอบแรงลมที่กระทำกับเสาสายส่ง มีดังนี้

$$TF = q_t C_d A_T \cos \psi \qquad \text{..... (2.7)}$$

$$LF = q_t C_d A_L \sin \psi \qquad \text{..... (2.8)}$$

เมื่อ q_t = หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง

A_T = พื้นที่รับลมหน้าเดียวเมื่อลมกระทำในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า

A_L = พื้นที่รับลมหน้าเดียวเมื่อลมกระทำในทิศขนานแนวสายไฟฟ้า

ส่วนประกอบแรงลมที่กระทำกับสายไฟฟ้า ซึ่งมีเฉพาะส่วนประกอบแรงในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้าเท่านั้น มีค่าเท่ากับ

$$F_c = q_c A \cos^2 \psi \qquad \text{..... (2.9)}$$

เมื่อ F_c = แรงบนสายไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า

q_c = หน่วยแรงดันลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า

A = พื้นที่รับลมของสายไฟฟ้า

กรณีนี้ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.3

ง) กรณีสายไฟขาด (Broken wires) ทั้งกรณีที่สายไฟฟ้า (Conductors) หรือสายป้องกันฟ้าผ่า (Overhead ground wires) ขาด กรณีนี้ให้คิดในสภาวะลมปานกลาง (Medium wind) หรือแรงลมที่คาบการกลับ 10 ปี กระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า รวมกับแรงในทิศขนานสายไฟฟ้าที่ขาดสมดุลย์ (Unbalanced longitudinal load) เนื่องจากสายไฟขาด โดยแรงในทิศขนานสายไฟนี้มีค่าเท่ากับค่าโคซายน์ของมุมระหว่างสาย (Line angle) ที่น้อยที่สุดคูณกับ 100% ของแรงดึงในสายป้องกันฟ้าผ่า หรือ p% ของแรงดึงในสายไฟฟ้าเฟสเดียว (Tension in one phase) โดยที่ p มีค่าเท่ากับ 100 และ 75 เมื่อเสาสายส่งเป็นชนิดเสาสายส่งรั้ง (หรือเสาสายส่งต้นมุม (Tension tower)) และ เสาสายส่งแขวน (Suspension tower) ตามลำดับ

สำหรับตัวคูณน้ำหนักบรรทุกให้ใช้เท่ากับ 1.1

จ) กรณีสายฉนวนขาด (Broken insulator string) ให้คิดในสภาวะลมปานกลาง กระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้าโดยมีสายไฟฟ้าทั้งหมดขึงอยู่ นอกจากนี้ให้คิดแรงเพิ่มเติมตรงตำแหน่งที่สายฉนวนขาดดังต่อไปนี้

ก. น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งเท่ากับน้ำหนักของสายไฟฟ้าทั้งสาย

ข. แรง 30% ของแรงดึงในสายไฟฟ้าในทิศทางขนานกับสาย

ค. แรงในทิศตั้งฉากสายไฟฟ้าเท่ากับ 50% ของแรงลมที่กระทำบนสายไฟฟ้าทั้งสาย ทั้งหมดนี้ให้ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.1

สำหรับการคิดสภาพแรงในกรณีสายไฟหรือสายฉนวนขาด ให้คิดสายไฟที่ขาดคราวละ 1 สายสำหรับเสาสายส่งแขวน หรือคราวละไม่เกิน 2 สายรวมกันสำหรับเสาสายส่งรั้ง

ฉ) กรณีบำรุงรักษา ให้คิดในสภาวะลมที่เกิดขึ้นบ่อยๆ (Most frequent wind) กระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า รวมกับแรงในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักคนและเครื่องมือ 100 กิโลกรัมตรงตำแหน่งที่ติดตั้งสายป้องกันฟ้าผ่า หรือน้ำหนักตรงตำแหน่งที่ติดตั้งสายไฟฟ้า 400 กิโลกรัมในเสาสายส่งแขวน หรือ 600 กิโลกรัมในเสาสายส่งรั้ง โดยพิจารณาตำแหน่งที่มีการบำรุงรักษาคราวละ 1 สาย กรณีนี้ใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.3

2.2 ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา

ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา (Davenport, Ho and Surry, 1995) มีพื้นฐานมาจากคู่มือหมายเลข 74 ของสมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งอเมริกา (American Society of Civil Engineers, 1991) เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับการคิดแรงและเงื่อนไขการรับแรงเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า สำหรับลมนั้นได้มีการศึกษาทั้งลมชนิดพายุไต้ฝุ่นและลมทั่วไปที่ไม่ใช่ไต้ฝุ่น (Mikitiuk และคณะ, 1995)

ในส่วนของข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ มีรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.2.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

ในการหาผลเนื่องจากแรงลม ให้คิดหน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างจาก

$$W = q_{ref} C_{exp} C_{shp} C_{dyn} \quad \text{..... (2.10)}$$

ในเมื่อ W = หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง (Wind force per unit area)

q_{ref} = หน่วยแรงดันลมอ้างอิงจากความเร็วลม (Reference velocity pressure) หรือเรียกย่อๆ ได้ว่าหน่วยแรงดันลมอ้างอิง

C_{exp} = ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (Exposure factor)

C_{shp} = ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic shape factor)

C_{dyn} = ตัวคูณผลพลศาสตร์ (Dynamic response factor)

หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างที่ได้จะเป็นหน่วยแรงลมสถิตย์เทียบเท่าที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนโครงสร้าง แรงลมที่กระทำบนโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงลมคูณกับพื้นที่รับลมหนึ่งหน้าบนเสาสายส่งในทิศตั้งฉากกับแรงลม โดยพื้นที่บนหน้าเสาสายส่ง ให้เท่ากับพื้นที่เต็มหน้าคูณกับค่าสัดส่วนความทึบ สำหรับกรณีที่แรงลมกระทำบนสายไฟหรือสายป้องกันฟ้าผ่า ให้คิดพื้นที่รับลมบนสายไฟฟ้าทั้งสองข้าง โดยการคิด

แรงลมให้คิดบนหลายๆ ทิศทาง สำหรับหน่วยแรงดันลมอ้างอิงและตัวคูณต่างๆ จะกล่าวถึงต่อไป

2.2.1.1 หน่วยแรงดันลมอ้างอิง

โดยทั่วไป หน่วยแรงดันลมมีค่าดังในสมการที่ (2.2) สำหรับหน่วยแรงดันลมอ้างอิง เป็นค่าหน่วยแรงดันลมเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากับความเร็วลมอ้างอิง หรือเท่ากับความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง โดยคิดที่คาบการกลับ 50 ปี ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติของความเร็วลมระบบธรรมดา (ที่ไม่ใช่ลมไต้ฝุ่น) ที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศในช่วง 10-30 ปี และสำหรับระบบลมไต้ฝุ่นได้จากการวิเคราะห์เชิงเลขโดยการจำลองมอนติคาร์โลของไต้ฝุ่นที่ผ่านในรัศมี 1000 กิโลเมตรรอบจุดที่พิจารณา โดยใช้ไต้ฝุ่นเกย์เป็นความเร็วพิกัดต่ำสุด และพิจารณาสภาวะลมไต้ฝุ่นเป็นสภาวะประลัย (Ultimate condition)

หน่วยแรงดันลมอ้างอิงเขียนได้ดังนี้

$$q_{ref} = \frac{1}{2}\rho_a V_{ref}^2 \qquad \text{..... (2.11)}$$

โดยที่ V_{ref} = ความเร็วลมอ้างอิง

กรณีที่ความเร็วลมไม่ได้วัดที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง จะสามารถแปลงกลับให้เป็นหน่วยแรงดันลมอ้างอิงได้ดังนี้

$$q_{ref} = q \times 0.39 \times \left(\frac{z_g}{z}\right)^{2\alpha} \qquad \text{..... (2.12)}$$

เมื่อ z_g = ความสูงเกรเดียนท์(Gradient height) ของสภาพภูมิประเทศเดียวกับหน่วยแรงดันลม q

z = ความสูงที่วัดความเร็วลม ที่ใช้หาหน่วยแรงดันลม q

α = ดัชนียกกำลังของสภาพภูมิประเทศเดียวกับหน่วยแรงดันลม q

ค่า z_g และ α สำหรับสภาพภูมิประเทศต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

สำหรับหน่วยแรงดันลมที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง แต่เวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมไม่เท่ากับ 1 ชั่วโมง หรือคาบการกลับไม่เท่ากับ 50 ปี ต้องนำมาปรับแก้เพื่อปรับเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมหรือคาบการกลับ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

เมื่อได้ค่าหน่วยแรงดันลมอ้างอิงแล้ว ยังต้องพิจารณาเพิ่มเติมผลเนื่องจากทิศทางลมและความเสี่ยงของระบบสายส่งไฟฟ้าภายใต้พายุไต้ฝุ่น ดังนี้

ก) ผลจากทิศทางลม (Wind directionality) เนื่องจากหน่วยแรงดันลมอ้างอิงที่หาได้ดังกล่าวคิดจากความเร็วลมอ้างอิงซึ่งวัดในทิศทางใดๆ ที่ตำแหน่งหนึ่งๆ สำหรับกรณีของเสาสายส่งไฟฟ้า มีการพิจารณาแรงลมในแต่ละทิศทางต่างๆ ซึ่งอ้างอิงกับทิศทางตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า สำหรับการคิดแรงบนเสาสายส่งไฟฟ้า ทั้งกรณีของพายุไต้ฝุ่นและลมทั่วไปที่ไม่ใช่ไต้ฝุ่น มีการใช้ตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิงก่อนที่จะนำไปหาหน่วยแรงดันลมอ้างอิง ซึ่งตัวคูณลดนี้ขึ้นกับทิศทางลมดังแสดงในตารางที่ 2.5

ข) ความเสี่ยงของระบบสายส่งไฟฟ้าภายใต้พายุไต้ฝุ่น เสาสายส่งไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของพายุไต้ฝุ่น จะเกิดความเสี่ยงมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของระบบโครงสร้าง ถ้าระบบโครงสร้างมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของระบบพายุ ขนาดของระบบโครงสร้างก็จะเกือบไม่มีผลต่อความเสี่ยงที่เกิดขึ้น แต่เมื่อระบบโครงสร้างมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของระบบพายุแล้ว ความเสี่ยงต่อระบบโครงสร้างจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเป็นเช่นนี้ ในการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าภายใต้พายุไต้ฝุ่น สายส่งที่มีความยาวมากจะต้องพิจารณาว่ามีความเสี่ยงมากกว่าสายส่งที่มีความยาวน้อย Mikitiuk และคณะ (1995) ได้กล่าวถึงการศึกษาความเสี่ยงในการออกแบบเสาสายส่งในประเทศไทยว่า หากต้องการออกแบบให้เสาสายส่งไฟฟ้ามีความเสี่ยงในการวิบัติ (Risk of failure) เท่าๆ กัน ในสายส่งที่ยาว 50 กิโลเมตรจะต้องเพิ่มความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 30 ในขณะที่สายส่งที่ยาว 200 กิโลเมตรขึ้นไปจะต้องเพิ่มความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 40 หรืออาจกล่าวได้ว่าตัวคูณเพิ่มบนหน่วยแรงดันลมอ้างอิงสำหรับสายส่งที่ยาว 50 กิโลเมตรและสายส่งที่ยาว 200 กิโลเมตรขึ้นไป มีค่าเท่ากับ 1.7 และ 2.0 ตามลำดับ

2.2.1.2 ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว

ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว ขึ้นอยู่กับความสูงของโครงสร้างเหนือระดับพื้นดิน และความขรุขระของพื้นผิว (Terrain roughness) ซึ่งบอกได้ในเทอมของระยะความขรุขระ (Roughness length) ซึ่งแสดงขนาดและการกระจายของสิ่งบดบังผิวหน้าที่ลมจะต้องพัดผ่าน ระยะความขรุขระบนพื้นผิวราบสำหรับสภาพภูมิประเทศต่างๆ ได้แสดงเป็นช่วงๆ ในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.6 การกระจายความเร็วลมแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ของกฎการยกกำลัง

ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ความสูง z ใดๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$C_{exp}(z) = B\left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha} \qquad \text{..... (2.13)}$$

เมื่อ $C_{exp}(z)$ = ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ความสูง z

B = สเกลแฟคเตอร์ ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ

α = ดัชนียกกำลัง ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ

ค่า B และ α สำหรับสภาพภูมิประเทศต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.6 และค่าตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่สภาพภูมิประเทศและความสูงต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

2.2.1.3 ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์

ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์เป็นอัตราส่วนของหน่วยแรงดันลมอากาศพลศาสตร์กับค่าหน่วยแรงดันลมที่ความสูงหนึ่งๆ ค่าตัวหารก็คือ ผลคูณของหน่วยแรงดันลมอ้างอิงกับตัวคูณผลสภาพพื้นผิว

ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตและรูปร่างของโครงสร้าง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลม ตัวคูณผลรูปร่างที่ใช้นี้เป็นผลจากรูปร่างทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งใช้กำหนดค่าแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นที่รับลมของโครงสร้าง การกำหนดค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์มักกำหนดควบคู่ไปกับตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ระดับความสูงเดียวกัน สำหรับในโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า มีการแบ่งโครงสร้างออกเป็นหลายส่วนย่อยๆ และจะมีการกำหนดตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์และตัวคูณผลสภาพพื้นผิวสำหรับในแต่ละส่วน

ก) ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนสายไฟฟ้า หรือค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนชิ้นส่วนรูปทรงกระบอก ขึ้นกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งมีค่าประมาณ 66700Vd ในอากาศ เมื่อให้ V เป็นค่าความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบที่ความสูงของสายไฟฟ้าในหน่วยเมตรต่อวินาที และ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้าในหน่วย เมตร โดยทั่วไปค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์นี้มีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 1.3 รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์กับตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม ในข้อกำหนดใหม่นี้แนะนำให้ใช้ค่า 1.2 สำหรับตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ของสายไฟฟ้าผิวเรียบ (Smooth) และมัดเป็นกลุ่ม (Bundled) นอกจากจะมีเอกสารยืนยันให้ใช้ค่าอื่นที่ต่ำกว่านี้

ข) ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนเสาสายส่ง สำหรับการหาค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนโครงสร้างสามมิติ อาจทำได้โดยการทดสอบโดยใช้แบบจำลองขนาดเท่าจริง (Full scale) ในอุโมงค์ลม หรือใช้ผลการทดลองจากอุโมงค์ลมของชิ้นส่วนโครงสร้างรูปร่างต่างๆ โดยต้องคิดผลของการบังกัน (Shielding effects) ของชิ้นส่วนด้านหน้าและด้านหลังด้วย แต่การหาค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนเสาสายส่งโดยวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยาก ในข้อกำหนดใหม่จึงได้เสนอให้ใช้ค่าตัวคูณผลรูปร่างทั้งหมด (Overall shape factor, C^{*}_{shp}) แทนสำหรับเสาโครงถัก (Lattice tower) ซึ่งมีที่มาจาก American Society of Civil Engineers (1991) ค่าตัวคูณผลรูปร่างทั้งหมดขึ้นกับค่าสัดส่วนความทึบของพื้นที่หน้าเสาโครงถักและแสดงไว้ในตารางที่ 2.8 สำหรับการคิดค่าตัวคูณผลรูปร่างทั้งหมดในทิศทางตั้งฉากกับแนวสายไฟในส่วนแขนของเสาสายส่ง (Tower arms) ให้ใช้ค่าสัดส่วนความทึบเป็น 1.0

2.2.1.4 ตัวคูณผลพลศาสตร์

ตัวคูณผลพลศาสตร์ได้คำจำกัดความว่าคือสัดส่วนของผลเนื่องจากแรงสูงสุดต่อผลเนื่องจากแรงเฉลี่ยที่คิดจากหน่วยแรงดันลมอ้างอิง ซึ่งตัวคูณนี้คำนึงถึงผลพลศาสตร์ของสิ่งเหล่านี้

ก) ความแปรปรวน (Fluctuating) ของหน่วยแรงดันลมรอบๆ วัตถุทู่ (Bluff body) ซึ่งรวมผลของเวค (Wake) และผลจากลมวนสลับ (Vortex shedding)

ข) ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลมเนื่องจากลมกระโชก (Gusts) กระทำในช่วงเวลาสั้นกว่าเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลม และกระทำบนบางส่วนหรือทั้งหมดของพื้นผิวโครงสร้าง

ค) ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลมที่เกิดขึ้นจากการสั่นไหวของโครงสร้างเมื่อถูกลมพัด

ง) แรงเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดกำทอน (Resonance) ของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนโครงสร้าง

โครงสร้างทั่วไปจะเกิดผลพลศาสตร์ดังกล่าวบ้างไม่มากก็น้อย โดยผลพลศาสตร์ทั้งหมดได้จากการรวมผล 2 ส่วน คือ ส่วนพื้นหลัง (Background component) ซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ (Quasi-statical) โดยปราศจากการขยายเพิ่มทางพลศาสตร์ และส่วนกำทอน (Resonant component) เนื่องจากความถี่ของการกระตุ้น (Excitation) ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของโครงสร้าง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 สมการโดยทั่วไปของผลเนื่องจากแรงสูงสุด , $\hat{r}$ เขียนได้ว่า

$$\hat{r} = \bar{r} + g_r \sigma_r \qquad \text{..... (2.14)}$$

เมื่อ $\hat{r}$ = ผลสูงสุดเนื่องจากแรง (Peak loading effect)

$\bar{r}$ = ผลเฉลี่ยเนื่องจากแรง (Mean loading effect)

g_r = ตัวประกอบสูงสุดทางสถิติ (Statistical peak factor)

σ_r = รากที่สองของค่าเฉลี่ยของกำลังสองของผลเนื่องจากแรง (RMS loading effect)

สมการข้างต้น สามารถเขียนใหม่ในรูปของ $\bar{r}$ ดังนี้

$$\hat{r} = (1+\frac{g_r \sigma_r}{\bar{r}})\bar{r} = C_{dyn}\,\bar{r} \qquad \text{... (2.15ก)}$$

โดยที่ $$C_{dyn} = 1+\frac{g_r \sigma_r}{\bar{r}} \quad ; \bar{r} \neq 0 \qquad \text{... (2.15ข)}$$

ผลของการตอบสนองแปรปรวน σ_r ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คำนึงถึงเฉพาะส่วนที่เกิดจากลมกระโชก ซึ่งค่าตัวคูณผลพลศาสตร์ C_{dyn} มักเรียกว่าตัวคูณการตอบสนองลมกระโชก (Gust response factor) ตัวคูณนี้จะพิจารณาถึงลักษณะการตอบสนองตามความถี่ (Frequency response characteristics) ของสายไฟฟ้าและเสาสายส่ง ลักษณะของลมกระโชก สภาพภูมิศาสตร์ที่มีผลต่อสายไฟฟ้าและเสาสายส่ง รูปที่ 2.5 แสดงรูปเสาสายส่งและสายไฟฟ้าพร้อมมิติต่างๆ ที่ใช้ในคำจำกัดความที่เกี่ยวข้อง การหาค่าตัวคูณผลพลศาสตร์ในที่นี้มีพื้นฐานมาจาก Davenport (1979) ซึ่งได้แสดงค่าของตัวคูณการตอบสนองลมกระโชก (Gust response factors) สำหรับสายไฟฟ้า (G_c) และเสาสายส่ง (G_t) ไว้ดังนี้

$$G_c = 1+g\varepsilon E\sqrt{B_c + R_c} \quad \text{; สำหรับสายไฟฟ้า} \quad \text{..... (2.16)}$$

$$G_t = 1+g\varepsilon E\sqrt{B_t + R_t} \quad \text{; สำหรับเสาสายส่ง} \quad \text{..... (2.17)}$$

ในเมื่อ

g = ตัวประกอบทางสถิติ (Statistical factor) มีค่าระหว่าง $3.5< g< 4.0$ ในที่นี้ให้ใช้ค่าเฉลี่ย g เท่ากับ 3.8

ε = ค่าคงที่ 0.75 เป็นค่าที่ใช้ประมาณ $(A^2+B^2)^{1/2} \approx \varepsilon(A+B)$ เมื่อ A,B มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน

E = ตัวประกอบสภาพพื้นผิว (Exposure factor) มีค่าเท่ากับ $\sqrt{24K}\left(\frac{z_{ref}}{h_c}\right)^{\alpha}$ สำหรับสายไฟฟ้า เมื่อ h_c เท่ากับความสูงประสิทธิผลของสายไฟฟ้า และ z_{ref} เท่ากับ 10 เมตร

K = สัมประสิทธิ์ความฝืดพื้นผิว (Surface drag coefficient)

B_c = ส่วนของผลพื้นหลังของสายไฟฟ้าซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ (Background quasi-static response component) ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า, f_c

R_c = ส่วนของผลกำทอน (Resonant response component) ของสายไฟฟ้า ที่ความถี่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า

B_t = ส่วนของผลพื้นหลังของเสาสายส่งซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง, f_t

R_t = ส่วนของผลกำทอนของเสาสายส่ง ที่ความถี่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง

เมื่อแทนค่า g, Ɛ, E และตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (C_{exp}) ลงไปในสมการตัวคูณผลกระโชกสำหรับสายไฟฟ้า จะได้

$$G_c = 1+14\sqrt{\frac{KB}{C_{exp}(h_c)}}\sqrt{B_c+R_c} \qquad \text{..... (2.18)}$$

โดยที่ h_c = ความสูงประสิทธิผลของสายไฟฟ้า มีค่าเท่ากับความสูงที่ระดับที่ติดตั้งสายไฟฟ้า ลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้าง (Sag)

$$C_{exp}(h_c) = B\left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha}$$

ค่า $\sqrt{KB}$ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.05 และ 0.09 ขึ้นกับสภาพพื้นผิว หากสมมติค่า 0.07 แทนลงในสมการ (2.18) จะได้ตัวคูณการตอบสนองลมกระโชกหรือตัวคูณผลพลศาสตร์ (C_{dyn}) ในรูปที่ง่ายขึ้น สำหรับสายไฟฟ้า ดังนี้

$$C_{dyn} = G_c = 1+\frac{1}{\sqrt{C_{exp}(h_c)}}\sqrt{B_c+R_c} \qquad \text{..... (2.19)}$$

และในทำนองเดียวกัน สำหรับเสาสายส่งจะได้ตัวคูณผลพลศาสตร์

$$C_{dyn} = G_t = 1+\frac{1}{\sqrt{C_{exp}(h_t)}}\sqrt{B_t+R_t} \qquad \text{..... (2.20)}$$

เมื่อ h_t = ความสูงประสิทธิผลของเสาสายส่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2/3 ของความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง

ในหัวข้อ ก) และ ข) ต่อไปนี้ จะแสดงค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในสมการ (2.19) และ (2.20)

ก) ตัวคูณผลพลศาสตร์บนสายไฟฟ้า

ส่วนพื้นหลัง (B_c) คำนวณได้จาก

$$B_c = \frac{1}{1+0.8\frac{L}{L_s}} \qquad \text{..... (2.21)}$$

เมื่อ L = ระยะระหว่างเสาสายส่ง (Typical span)

L_s = สเกลอินทิกรัลทางขวางของการแปรปรวน (Transverse integral scale of turbulence) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 65 เมตร

ส่วนกำทอน (R_c) ซึ่งกระทำที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_c = 0.0113\left(\frac{f_c h_c}{\overline{V}_{h_c}}\right)^{-\frac{5}{3}} \frac{h_c}{L}\frac{1}{\zeta_c} \qquad \text{..... (2.22)}$$

เมื่อ f_c = ความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า ประมาณโดยใช้หลักการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา เท่ากับ $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3g}{2\,sag}}$ หน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational acceleration) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตร/วินาที^{2}

sag = ระยะตกท้องช้าง มีค่าประมาณ $\frac{w^2}{8T}$

w = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า

T = แรงดึงในสายไฟฟ้า

$\overline{V}_{h_c}$ = ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของสายไฟฟ้า, h_c

ζ_c = 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 = มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า

ถ้าสมมติค่า T/w เท่ากับ 1600 เมตร เพื่อให้สมการง่ายขึ้น ความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า f_c จะมีค่าประมาณ 70/L เมื่อให้ L มีหน่วยเป็นเมตร เมื่อแทนค่า f_c และ ζ_c สมการที่ (2.22) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$R_c = 0.118\left(\frac{70h_c}{\overline{V}_{h_c}L}\right)^{-\frac{2}{3}}\frac{m}{\rho_a dL} \qquad \text{..... (2.23)}$$

ข) ตัวคูณผลพลศาสตร์บนเสาสายส่ง

ส่วนพื้นหลัง (B_t) และส่วนกำทอน (R_t) คำนวณได้จาก

$$B_t = \frac{1}{1+0.375\frac{h}{L_s}} \qquad \text{..... (2.24)}$$

$$R_t = 0.0123\left(\frac{f_t h_t}{\overline{V}_{h_t}}\right)^{-\frac{5}{3}}\frac{1}{\zeta_t} \qquad \text{..... (2.25)}$$

เมื่อ h = ความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง (เมตร)

f_t = ความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง (Hz) ถ้าไม่มีค่าที่เชื่อถือได้จากที่อื่น อาจใช้ค่าประมาณ 100/h สำหรับเสาโครงถัก (Lattice towers) ซึ่งได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง (f_t) และความสูงของเสาสายส่ง (h) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

$\overline{V}_{h_t}$ = ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของเสาสายส่ง, h_t

ζ_t = อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ของเสาสายส่ง มีค่าประมาณ 1% ถึง 3% ของความหน่วงวิกฤติ

2.2.2 สภาพรับน้ำหนัก

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ให้พิจารณาโครงสร้างเสาสายส่งรับน้ำหนักในสภาวะต่างๆ ดังนี้

ก) แรงลมกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า (Transverse wind) คือ ให้แรงลมกระทำกับเสาสายส่งและสายไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ หน่วยแรงลมที่ได้จากสมการที่ (2.10) คูณกับพื้นที่รับลมของเสาสายส่งและสายไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่พื้นที่รับลมของเสาสายส่งเท่ากับพื้นที่เต็มหน้าคูณกับค่าสัดส่วนความทึบ

ข) แรงลมกระทำในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า (Longitudinal wind) คือ ให้แรงลมกระทำกับเสาสายส่งในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า การคำนวณแรงลมคล้ายกับกรณีแรงลมกระทำตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า แต่ในกรณีนี้ ใช้พื้นที่และสัดส่วนความทึบด้านที่ขนานกับแนวสายไฟฟ้า และสำหรับแรงลมกระทำกับสายไฟฟ้าถือว่าเป็นศูนย์ได้

ค) แรงลมกระทำในทิศทางทำมุมเอียง ψ กับแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า (Yawed ψ wind) จะได้แรงลัพธ์ที่กระทำกับเสาสายส่ง ดังสมการที่ (2.26)

$$F_t = (1+0.2\ SIN^2 2\psi)(F_T\ COS^2\psi + F_L\ SIN^2\psi) \quad \text{..... (2.26)}$$

เมื่อ F_t = แรงลัพธ์ที่กระทำกับเสาสายส่ง

F_T = แรงบนเสาสายส่งเนื่องจากลมกระทำ ในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า มีค่าเท่ากับแรงในกรณี ก)

F_L = แรงบนเสาสายส่งเนื่องจากลมกระทำ ในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า มีค่าเท่ากับแรงในกรณี ข)

แรงลัพธ์ที่กระทำกับเสาสายส่ง สามารถแตกให้เป็นส่วนประกอบแรงในแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า และส่วนประกอบแรงในแนวขนานสายไฟฟ้า ดังนี้

$$TF = F_t\ COS\ \psi \quad \text{..... (2.27)}$$

$$LF = F_t\ SIN\ \psi \quad \text{..... (2.28)}$$

เมื่อ TF = ส่วนประกอบแรงในแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า

LF = ส่วนประกอบแรงในแนวขนานสายไฟฟ้า

ส่วนแรงที่กระทำกับสายไฟฟ้า จะมีส่วนประกอบแรงในแนวตั้งฉากกับสายไฟฟ้าเท่านั้น ดังสมการที่ (2.29)

$$F_c = q_{ref}\, C_{exp}\, C_{shp}\, C_{dyn}\, A \cos^2\psi \qquad \text{..... (2.29)}$$

เมื่อ F_c = แรงที่กระทำกับสายไฟฟ้า ในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า

A = พื้นที่รับลมของสายไฟฟ้า

ง) แรงแพชโหลด (Patch loading) ในกระแสลมที่แปรปรวน ผลของแรงที่ไม่สมดุลย์ (Unbalanced loading) เนื่องจากลมกระโชกที่ไม่สัมพันธ์กัน (Uncorrelated gusts) บนบางช่วงความสูงของเสาสายส่ง อาจมีผลต่อชิ้นส่วนบางชิ้นของโครงสร้างมากกว่าเมื่อพิจารณาให้แรงกระทำตลอดความสูงของเสาสายส่ง จึงควรพิจารณาแพชโหลดด้วยในการคำนวณผลพลศาสตร์ของชิ้นส่วนโครงสร้างได้ ซึ่งรูปแบบของแรงแพชโหลดบนโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ผลเนื่องจากแรงแพชโหลดหาได้จาก

$$\hat{r} = \bar{r} + \sqrt{\sum_i \tilde{r}^2_{PL_i}} \qquad \text{..... (2.30)}$$

เมื่อ $\hat{r}$ = ผลสูงสุดเนื่องจากแรง

$\bar{r}$ = ผลเฉลี่ยเนื่องจากแรง ได้จากการใส่แรงเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับหน่วยแรงดันลมเฉลี่ย ($\bar{W}$) คูณกับพื้นที่รับลมของเสาสายส่ง

$\bar{W}$ = $q_{ref}\, C_{exp}\, C^{*}_{shp}$

$\tilde{r}_{PL_i}$ = ผลเนื่องจากหน่วยแรงแพชโหลดที่ I, W_{PL_i} เมื่อ i = 1-4 กระทำบนเสาสายส่ง โดยสมมติว่า W_{PL_i} มีการกระจายสม่ำเสมอบนบางช่วงเสาสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.7

W_{PL_i} = $q_{ref}\, C^{*}_{shp}\, C_{exp}(z_i) \left(C_{dyn} - 1\right)$

z_i = ความสูงเฉลี่ยของแรงแพชโหลดที่ i

2.2.3 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติม

ในการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ นอกจากจะต้องพิจารณาสภาพรับน้ำหนักดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสิ่งที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม คือ การไม่เสถียรทางแอโรอีลาสติก (Aeroelastic instability) การสั่นหรือการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงลม สามารถทำให้เกิดแรงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic forces) ซึ่งอาจมีทิศตรงข้ามหรือเสริมการเคลื่อนที่ ขึ้นกับค่าความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic damping) ค่าความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์นี้ มีความสัมพันธ์กับความเร็วลม และรูปร่างทางเรขาคณิตของโครงสร้าง ความหน่วงของโครงสร้าง (Structural damping) จะต้องนำมารวมกับความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์ และในบางกรณีที่ความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์มีค่าเป็นลบ ก็เท่ากับไปทำให้ความหน่วงรวมมีค่าลดลง และเมื่อผลรวมของความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์และความหน่วงของโครงสร้างมีค่าเป็นศูนย์ ก็จะเกิดการไม่เสถียรทางแอโรอีลาสติกขึ้น และจะทำให้แอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

การที่ความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์มีค่าเป็นลบ อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้หลายสภาวะ โดยทั่วไปจะมีการจำกัดความชะลูดของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไม่เสถียรทางแอโรอีลาสติก สำหรับโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า ควรออกแบบชิ้นส่วนให้ความชะลูดไม่เกินค่าต่อไปนี้

$$\frac{L}{r} < 65\left(\frac{D}{r}\right)^{1/2} \quad ; \text{สำหรับโครงสร้างเหล็ก}$$

$$\frac{L}{r} < 40\left(\frac{D}{r}\right)^{1/2} \quad ; \text{สำหรับโครงสร้างอะลูมิเนียม}$$

เมื่อ $\frac{L}{r}$ = ความชะลูดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

L = ความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง

r = รัศมีไจเรชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้าง

D = ความกว้างของชิ้นส่วนโครงสร้างด้านที่ตั้งฉากกับลม

2.3 การเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า

ในการเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าทั้งสองวิธี คือ ข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ มีข้อแตกต่างในค่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้างและสภาพรับน้ำหนัก พอสรุปได้ดังนี้

ในเรื่องของหน่วยแรงดันลมบนโครงสร้าง ข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้คิดที่ความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ที่คาบการกลับ 50 ปี บนพื้นผิวโล่ง แต่ในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ให้ใช้หน่วยแรงดันลมอ้างอิงคูณกับตัวคูณผลสภาพพื้นผิว ซึ่งหน่วยแรงดันลมอ้างอิงคิดที่ความเร็วลมอ้างอิง หรือเท่ากับความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร และคาบการกลับ 50 ปี บนพื้นผิวโล่ง และต้องคิดผลจากทิศทางลม อีกทั้งเมื่อลมเป็นพายุไต้ฝุ่นก็ต้องมีตัวคูณเพิ่มความเสี่ยง เมื่อนำมาคูณกับตัวคูณผลสภาพพื้นผิว จะปรับหน่วยแรงดันลมให้อยู่ที่ระดับความสูงของโครงสร้าง หรือปรับสภาพภูมิประเทศตามบริเวณที่ก่อสร้าง สำหรับความสูงของโครงสร้างที่พิจารณา ในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ใช้ความเร็วลมบนเสาสายส่งที่กึ่งกลางความสูงของเสาสายส่ง และความเร็วลมบนสายไฟฟ้าที่ระดับที่ติดตั้งสายไฟฟ้า ลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้าง สำหรับในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ เสาสายส่งให้แบ่งเป็นหลายช่วงย่อยๆ และใช้ความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของแต่ละช่วง ส่วนความเร็วลมบนสายไฟฟ้า ให้คิดที่ความสูงเดียวกับในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ตัวคูณผลรูปร่างในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ใช้ค่าเดียวกันตลอดความสูงของโครงสร้าง คือ 2.9 บนเสาสายส่ง และ 1.0 บนสายไฟฟ้า สำหรับในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนเสาสายส่งจะแบ่งคิดเป็นช่วงๆ เช่นเดียวกับการคิดหน่วยแรงดันลม ซึ่งจะขึ้นกับค่าสัดส่วนความทึบของเสาสายส่งในแต่ละช่วง และตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนสายไฟฟ้าให้ใช้ค่า 1.2 สำหรับตัวคูณผลกระโชกบนความเร็วลมในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือตัวคูณผลพลศาสตร์บนหน่วยแรงดันลมในข้อกำหนดที่เสนอ

โดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ การหาตัวคูณผลพลศาสตร์ในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ก็มีสูตรให้คิดเป็นค่าเดียวกันตลอดความสูงของโครงสร้าง โดยตัวคูณผลพลศาสตร์ในเสาสายส่ง ให้คิดที่ความสูงประสิทธิผล หรือ 2/3 ของความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง ส่วนในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ใช้ตัวคูณผลกระโชกบนความเร็วลมที่กระทำกับเสาสายส่งเท่ากับ 1.3 ซึ่งใช้ในการแปลงความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ให้เป็นลมกระโชก 2 วินาที และไม่มีการใช้ตัวคูณผลกระโชกบนสายไฟฟ้า และนอกจากนี้ ในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ มีส่วนเพิ่มเติมในสภาพรับน้ำหนักจากข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยคือ การคิดแรงแพซโหลด เพื่อคิดผลพลศาสตร์เนื่องจากลมกระโชกกระทำเพียงบางส่วนของเสาสายส่งได้ ซึ่งในบางครั้ง อาจก่อให้เกิดแรงบนชิ้นส่วนโครงสร้างมากกว่าลมที่กระทำตลอดความสูงของเสาสายส่ง

จากการเปรียบเทียบข้อกำหนดทั้งสองวิธี ดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าหน่วยแรงดันลมในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อไม่พิจารณาความสูงของตำแหน่งที่คิดความเร็วลม จะมีค่าสูงกว่าในอีกข้อกำหนดหนึ่งประมาณ 1.08 เท่า ตามตารางที่ 2.3 เนื่องจากระยะเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมเป็น 10 นาที และ 1 ชั่วโมง สำหรับวิธีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความสูงที่แรงลมกระทำ จะเห็นว่าในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คิดแรงลมตลอดความสูงของโครงสร้างด้วยความสูงตรงกึ่งกลางเสาสายส่ง ซึ่งเมื่อเทียบกับในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ที่คิดเป็นช่วงย่อยๆ หลายๆ ช่วง ซึ่งน่าจะละเอียดถูกต้องกว่า แรงลมบนเสาสายส่งเมื่อคิดด้วยวิธีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จะมีค่าแรงที่บริเวณฐานของเสาสายส่งมากเกินไป และค่าแรงที่บริเวณยอดของเสาสายส่งน้อยเกินไป ประกอบกับโครงสร้างเสาสายส่งมีลักษณะคล้ายเสายื่น ผลเนื่องจากแรงลมบนชิ้นส่วนโครงสร้างจึงน่าจะน้อยกว่าเมื่อคิดด้วยวิธีของมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าตัวคูณผลกระโชกในข้อกำหนดที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งใช้ค่า 1.3 บนเสาสายส่ง และค่านี้ได้จากการแปลงความเร็วลม

เฉลี่ย 10 นาที ให้เป็นลมกระโชก 2 วินาที เมื่อพิจารณาในตารางที่ 2.3 จะได้ว่าตัวคูณสำหรับแปลงความเร็วลมเฉลี่ย 10 นาที ให้เป็น 2 วินาที จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.52 $(\approx \sqrt{2.51/1.08})$ และ 1.67 $(\approx \sqrt{3.0/1.08})$ แสดงว่าค่าที่ใช้ 1.3 ต่ำเกินไป และเมื่อพิจารณารวมกับการที่หน่วยแรงดันลมในวิธีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สูงกว่าในวิธีของมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโออยู่ 1.08 เท่า ค่าตัวคูณผลกระโชกนี้จึงเทียบเท่ากับค่าตัวคูณผลพลศาสตร์บนหน่วยแรงดันลมในวิธีของมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ เท่ากับ 1.56 ($\approx 1.3^2/1.08$) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าตัวคูณผลพลศาสตร์ที่ได้จากสูตรในข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ที่มีค่าประมาณ 2.0 ในพื้นผิวโล่ง จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีของมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ จะมีระดับความปลอดภัยสูงกว่าการออกแบบด้วยวิธีเดิมที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย