

การเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบและวิธีการวิเคราะห์เพื่อ
การออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าในประเทศไทย



นางสาว สุมลรัตน์ รัตนสุภากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-097-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF GUIDELINES AND ANALYSIS METHODS FOR
TRANSMISSION TOWER DESIGN IN THAILAND

Miss Sumolrat Ratanasupakorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-633-097-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบและวิธีการวิเคราะห์เพื่อ
การออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าในประเทศไทย

โดย

นางสาว สุมลรัตน์ รัตนสุภากร

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุษวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุสม)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



สมลรัตน์ รัตนสุภากร : การเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบและวิธีการวิเคราะห์เพื่อ
การออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าในประเทศไทย (COMPARISON OF GUIDELINES AND
ANALYSIS METHODS FOR TRANSMISSION TOWER DESIGN IN THAILAND)
อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, 138 หน้า. ISBN 974-633-097-7

เหตุการณ์พายุไต้ฝุ่นเกย์ซึ่งพัดผ่านบริเวณภาคใต้ เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 และยังมีผลให้เสาสายส่งไฟฟ้าในจังหวัดชุมพรและประจวบคีรีขันธ์ล้มพังเสียหายกว่า 30 ต้น โดยที่เสาสายส่ง 6 ต้นในจำนวนนั้นพังเสียหายในสภาพที่ยังไม่ได้ติดตั้งสายไฟฟ้านั้น ได้ก่อให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องทบทวนข้อกำหนดในการคำนวณแรงกระทำที่ใช้ในการออกแบบเสาสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

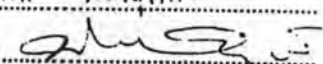
การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า โดยใช้ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา รวมทั้งทำการศึกษาคณិតศึกษาหาค่าความเร็วลมวิกฤติของเสาสายส่งชนิด DA1 (ซึ่งวิบัติเมื่อคราวพายุไต้ฝุ่นเกย์ 3 ต้น) ในสาย 230 เควี ในสภาพที่ไม่ได้ติดตั้งสายไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วลมเนื่องจากพายุไต้ฝุ่นเกย์ซึ่งเสนอโดย Mikitiuk และคณะ (1995) โดยทำการวิเคราะห์ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต

จากการเปรียบเทียบข้อกำหนดทั้งสอง พบว่า ข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอคิดแรงลมบนโครงสร้างโดยคำนึงถึงการกระจายความเร็วตามกฎการยกกำลัง และยังพิจารณาแรงแพชโหลด (Patch load) เนื่องจากลมกระโชกกระทำเพียงบางส่วนของเสาสายส่ง ด้วยเหตุนี้ แรงลมที่กระทำบนเสาสายส่งเมื่อใช้ข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอจึงมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ข้อกำหนดการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ซึ่งพิจารณาการกระจายของแรงลมสม่ำเสมอและไม่คำนึงถึงแพชโหลด สำหรับในเสาสายส่ง DA1 เมื่อแรงลมกระทำในทิศตั้งฉากกับสายไฟฟ้า แรงเฉือนและโมเมนต์พื้นฐานมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ข้อกำหนดการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ 25 และ 37% ตามลำดับ และสำหรับแรงลมกระทำในทิศขนานสายไฟฟ้า แรงเฉือนพื้นฐานมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่โมเมนต์พื้นฐานจะมีค่าสูงกว่าราว 8%

เมื่อทำการวิเคราะห์เสาสายส่ง DA1 โดยวิธีเชิงเส้น จะได้แรงภายในวิกฤติในชิ้นส่วนทแยง เมื่อใช้ข้อกำหนดการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โดยมีค่าเท่ากับ 1.28 เท่าของกำลังรับแรงอัดของหน้าตัดของชิ้นส่วนนั้น และชิ้นส่วนที่มีแรงภายในเกินกำลังรับแรงอัดส่วนมากจะเป็นชิ้นส่วนทแยง ในกรณีของข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอ ชิ้นส่วนส่วนมากที่มีแรงภายในเกินกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนเป็นชิ้นส่วนขา โดยที่ชิ้นส่วนที่วิกฤติที่สุดเกิดแรงภายในเป็น 1.52 เท่าของกำลังรับแรงอัด

สำหรับกรณีที่เกิดผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตบนเสาสายส่ง DA1 ในสภาพที่ยังไม่ได้ติดตั้งสายไฟฟ้า จะได้ความเร็วลมวิกฤติเฉลี่ย 1 ชั่วโมง เมื่อใช้ข้อกำหนดการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ และข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอเท่ากับ 38.4-47.2 และ 28.9-39.3 เมตร/วินาที ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับมุมที่แรงลมกระทำ และเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วลมเนื่องจากพายุไต้ฝุ่นเกย์ ซึ่งมีค่าประมาณ 37.5 เมตร/วินาที พบว่าข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอให้ค่าความเร็วลมวิกฤติต่ำกว่าความเร็วลมเกณฑ์ในเกือบทุกทิศทางของลมยกเว้นทิศทางตั้งฉาก (หรือเกือบตั้งฉาก) กับสายไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมสูงกว่าความเร็วลมเกณฑ์เล็กน้อย ทำให้สามารถอธิบายการวิบัติของเสาสายส่งได้ ดังนั้นจึงสมควรพิจารณาผลของความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตในการออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดเวสเทิร์นออนตาริโอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่ไม่ได้ติดตั้งสายไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา2538.....

ลายมือชื่อนิสิต สิวลรัตน์ รัตนสุภากร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C415288: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TRANSMISSION TOWER/ LATTICE TOWER/ GEOMETRIC NONLINEAR
SUMOLRAT RATANASUPAKORN : COMPARISON OF GUIDELINES AND ANALYSIS
METHODS FOR TRANSMISSION TOWER DESIGN IN THAILAND. THESIS ADVISOR :
PROF. PANITAN LUKKUNAPRASIT, Ph.D. 138 pp. ISBN 974-633-097-7

The Typhoon Gay that struck the upper part of Southern Thailand on November 4, 1989, causing severe damages to more than 30 transmission towers including 6 towers which failed in the unstrung condition in Chumphon and Prachuap-Khirikhan, prompted the necessity to review the adequacy of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) guidelines for calculating forces in transmission tower design.

One of the objectives of this research was to compare transmission tower design based on the existing EGAT design guidelines and the new ones proposed by the University of Western Ontario (UWO). The critical wind speed for the case study tower "DA1" (three of which failed in Typhoon Gay) in the 230 kV line with no cables erected yet was determined in order to compare it with the Gay wind speed predicted by Mikitiuk et al.(1995). Both linear and geometric nonlinear analyses were performed.

Comparison of the two guidelines reveals that the UWO guidelines assume the Power Law distribution in addition to incorporating the patch load condition to account for the dynamic response from gusts acting on some parts of the towers, resulting in considerable larger forces than those depicted by the EGAT criteria which assume uniform distribution. For tower DA1, the base shear and moment for transverse wind are 25 and 37% higher than those based on the EGAT guidelines, respectively, whereas for the longitudinal wind direction, the base shears are about the same while the base moment is 8% higher for the UWO guidelines.

Linear analyses of tower DA1 based on the EGAT guidelines resulted in compressive force in the most critical member, which was a bracing member, 1.28 times the member capacity. Moreover, most of the members overstressed were bracing members. For the case of the UWO guidelines, most of the members with resulting internal forces exceeding their capacities were leg members, with the most critical member stressed to 1.52 times its compression capacity.

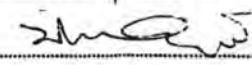
Geometric nonlinear analyses of the tower without cables gave rise to the critical mean hourly wind speeds (at 10 metres height) of 38.4-47.2 m/s for the EGAT guidelines and 28.9-39.3 m/s for the UWO specifications, depending on wind directions. The UWO critical wind speeds were less than the Gay wind speed of 37.5 m/s in most wind directions (except transverse or nearly transverse directions in which the critical wind speed was a little higher than the Gay wind speed). The failure of the towers could thus be predicted. Geometric nonlinearity should therefore be considered in transmission tower design especially in the unstrung condition.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2538.....

ลายมือชื่อนิสิต.....สมิลาภรณ์.....วิเศษศักดิ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่างๆ สำหรับการวิจัยมาด้วยดีตลอด ทั้งยังได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี และ อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุขสม ที่ได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณวรวิทย์ ชำปัญญา กรรมการผู้จัดการ บริษัท ทรานส์เล็ค จำกัด เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ พี่ๆ วิศวกรในบริษัท ทรานส์เล็ค จำกัด ทุกคน ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือด้านข้อมูล และแนะนำให้ความรู้เบื้องต้นอันจะนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้มอบทุนบางส่วนเพื่อใช้ในการวิจัย

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สมลรัตน์ รัตนสุภากร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.4 ข้อสมมติฐานที่ใช้.....	5
1.5 ขอบข่ายของการวิจัย.....	6
1.6 วิธีการวิจัย.....	6
2. ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า.....	8
2.1 ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย.....	8
2.1.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง.....	8
2.1.1.1 ความเร็วลมอ้างอิง.....	9
2.1.1.2 ตัวคูณผลรูปร่าง.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2 สภาพรับน้ำหนัก.....	11
2.2 ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศ แคนาดา.....	14
2.2.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง.....	14
2.2.1.1 หน่วยแรงตันลมอ้างอิง.....	15
2.2.1.2 ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว.....	16
2.2.1.3 ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์.....	17
2.2.1.4 ตัวคูณผลพลศาสตร์.....	18
2.2.2 สภาพรับน้ำหนัก.....	24
2.2.3 ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติม.....	26
2.3 การเปรียบเทียบข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า.....	27
3. การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต.....	30
3.1 ความนำ.....	30
3.2 ความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต.....	31
3.3 เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิต.....	32
3.3.1 เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิตสำหรับชิ้นส่วนรับแรงในแนวแกนใน ปริภูมิสามมิติ.....	36
3.3.2 เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิตสำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัดในปริภูมิสามมิติ	39
3.4 ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพ.....	42
4. แบบจำลองในกรณีศึกษา.....	44
4.1 แบบจำลอง.....	44
4.2 แรงที่กระทำบนแบบจำลองในกรณีศึกษา.....	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้า ที่กำหนดโดยการไฟฟ้า ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	45
4.2.2	ข้อกำหนดใหม่ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศ แคนาดา.....	47
4.3	การตรวจสอบแบบจำลอง.....	49
4.4	การออกแบบเสาสายส่ง.....	49
5.	ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ.....	50
5.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งแบบเชิงเส้น.....	50
5.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาสายส่งแบบไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต.....	53
6.	สรุปผลการวิจัย.....	54
	เอกสารอ้างอิง.....	106
	ภาคผนวก.....	110
	ภาคผนวก ก โคออร์ดิเนตของจุดต่อเอเลเมนต์ในแบบจำลอง.....	111
	ภาคผนวก ข การเชื่อมต่อจุดต่อในเอเลเมนต์ และคุณสมบัติของชิ้นส่วน.....	115
	ภาคผนวก ค ไดอะแกรมแรงแสดงน้ำหนักบรรทุกคงที่ ที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสาย ส่งไฟฟ้า.....	124
	ภาคผนวก ง ไดอะแกรมแสดงสภาวะลมแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาสายส่ง เมื่อ ออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	129
	ภาคผนวก จ กำลังรับแรงของหน้าตัด.....	134
	ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ K_t สำหรับคาบการกลับ t ปี เมื่อคิดจากสถิติ t_0 ปี.....	56
2.2 ค่าความสูงเกรเดียนท์ (z_0) และดัชนียกกำลัง (α) สำหรับสภาพภูมิประเทศต่าง ๆ	56
2.3 ค่าปรับแก้บนหน่วยแรงดันลมเพื่อปรับเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมให้เป็น 1 ชั่วโมง.....	56
2.4 ค่าปรับแก้บนหน่วยแรงดันลม เพื่อปรับคาบการกลับให้เป็น 50 ปี.....	57
2.5 ตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิง ในทิศทางต่างๆ.....	57
2.6 ค่าระยะความขรุขระ (z_0), สเกลแฟคเตอร์ (B) และดัชนียกกำลัง (α) สำหรับสภาพภูมิประเทศต่าง ๆ.....	57
2.7 ค่าตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (C_{exp}) ที่สภาพภูมิประเทศและความสูงต่างๆ.....	58
2.8 ค่าตัวคูณผลรูปร่างทั้งหมด (C_{shp}) สำหรับเสาโครงถัก.....	58
4.1 สภาพรับน้ำหนัก เมื่อออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดการออกแบบเสาสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	59
4.2 แรงลมที่กระทำบนโครงสร้างเสาสายส่ง ในทิศทางตั้งฉากสายไฟฟ้า (F_T) ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	62
4.3 แรงลมที่กระทำบนโครงสร้างเสาสายส่ง ในทิศทางขนานสายไฟฟ้า (F_L) ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	63
4.4 แรงลมที่กระทำบนโครงสร้างเสาสายส่ง ในทิศทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเฉพาะเสาสายส่งเพียงอย่างเดียว ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	64
4.5 แรงลมที่กระทำบนโครงสร้างเสาสายส่ง ในทิศทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากสายไฟฟ้า เมื่อพิจารณารวมทั้งเสาสายส่งและสายไฟฟ้า ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	65
4.6 แรงแพชโหลตในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แรงแพชโพลดในทึศขนานแนวสายไฟฟ้า ตามข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัย เวสเทิร์นออนตาริโอ ประเทศแคนาดา.....	68
4.8 การเปรียบเทียบแรงภายในบางชิ้นส่วนเมื่อวิเคราะห์ด้วย GTSTRUDL และค่า จากบริษัท เอส เอ อี จำกัด.....	69
4.9 สัดส่วนแรงดัดต่อกำลังรับแรงดัดสูงสุดในหน้าตัดขนาดต่างๆ.....	70
5.1 ผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้น (พิจารณาเฉพาะแรงอัด) โดยใช้ข้อกำหนด ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	71
5.2 ผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้น (พิจารณาเฉพาะแรงดึง) โดยใช้ข้อกำหนด ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	76
5.3 ผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้น (พิจารณาเฉพาะแรงอัด) โดยใช้ข้อกำหนด ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ.....	77
5.4 ผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้น (พิจารณาเฉพาะแรงดึง) โดยใช้ข้อกำหนด ที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ.....	82
5.5 สรุปผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบเชิงเส้น.....	83
5.6 ผลการวิเคราะห์เสาสายส่งแบบไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต.....	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะเสาสายส่งไฟฟ้าชนิด DA1.....	85
2.1 การกำหนดทิศทาง มุมที่ลมกระทำกับโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า.....	86
2.2 รูปแสดงระยะความขรุขระบนพื้นผิวราบ สำหรับสภาพภูมิประเทศต่างๆ.....	86
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณผลรูปว่าง (Force coefficient) และตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number).....	87
2.4 รูปแสดงส่วนพื้นหลัง (B) และส่วนกำทอน (R) ของผลพลศาสตร์ บนสายไฟฟ้าและเสาสายส่ง.....	88
2.5 รูปเสาสายส่งและสายไฟฟ้าพร้อมมิติต่างๆ ที่ใช้ในคำจำกัดความที่เกี่ยวข้อง.....	88
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง (Natural frequency) และความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง (Overall tower height).....	89
2.7 รูปแบบการหาแรงแพชโหลดบนโครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า.....	90
3.1 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (P) และการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง (D) ที่สภาวะการขาดเสถียรภาพ.....	91
3.2 (ก) รูปแสดงเอเลเมนต์ที่มีแรงตามแนวแกนเริ่มต้น (ข)-(จ) รูปแสดงลักษณะของฟังก์ชันแสดงรูปว่างที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั่วในแต่ละดีกรีความอิสระ.....	91
3.3 ชั้นส่วนรับแรงในแนวแกนในปริภูมิสามมิติ.....	92
3.4 ชั้นส่วนรับแรงดัดในปริภูมิสามมิติ.....	92
3.5 รูปแสดงการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีทำซ้ำโดยตรง.....	93
4.1 รูปด้านข้างของแบบจำลองเสาสายส่งไฟฟ้า แสดงจุดต่อเอเลเมนต์.....	94
4.2 รูปด้านข้างของแบบจำลองเสาสายส่งไฟฟ้า แสดงเอเลเมนต์.....	96
4.3 ความเร็วลมพื้นฐาน (Basic wind speed) สำหรับประเทศไทย.....	98
4.4 รูปแสดงการแบ่งส่วนในแบบจำลองเสาสายส่ง เมื่อออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แรงลมบนเสาสายส่งเมื่อคิดแรงในแต่ละข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ โดยรวมผลของตัว คูลน้ำหนักบรรทุก เมื่อแรงลมกระทำในทิศทาง (ก) ตั้งฉากสายไฟฟ้า (ข) ขนาน สายไฟฟ้า.....	100
5.2 สัดส่วนแรงภายในและกำลังรับแรงอัด สำหรับกลุ่มชิ้นส่วนขา ในแต่ละข้อกำหนดที่ ใช้ออกแบบ เมื่อยังไม่ติดตั้งสายไฟ และติดตั้งสายไฟแล้ว.....	101
5.3 สัดส่วนแรงภายในและกำลังรับแรงอัด สำหรับกลุ่มชิ้นส่วนทแยงในหน้าที่ตั้งฉากกับ แนวสายไฟฟ้า ในแต่ละข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ เมื่อยังไม่ติดตั้งสายไฟ และติดตั้ง สายไฟแล้ว.....	102
5.4 สัดส่วนแรงภายในและกำลังรับแรงอัด สำหรับกลุ่มชิ้นส่วนทแยงในหน้าที่ขนานกับ แนวสายไฟฟ้า ในแต่ละข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ เมื่อยังไม่ติดตั้งสายไฟ และติดตั้ง สายไฟแล้ว.....	103
5.5 กราฟเส้นแสดงความเร็วลมวิกฤติของเสาสายส่งเมื่อยังไม่ติดตั้งสายไฟฟ้า ใน แต่ละข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ โดยแสดงในทิศต่างๆ.....	104
5.6 ลักษณะการโก่งเดาะของเสาสายส่งเมื่อวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต.....	105

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่รับลมของโครงสร้าง
A_L	=	พื้นที่รับลมของเสาสายส่งหน้าเดียว เมื่อลมกระทำในทิศขนานกับแนวสายไฟฟ้า
A_T	=	พื้นที่รับลมของเสาสายส่งหน้าเดียว เมื่อลมกระทำในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า
B	=	สเกลแฟคเตอร์ ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ
B_c	=	ส่วนของผลพื้นหลังของสายไฟฟ้าซึ่งกระทำกึ่งสถิติ ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า
B_t	=	ส่วนของผลพื้นหลังของเสาสายส่งซึ่งกระทำกึ่งสถิติ ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง
C_c	=	ความชะลุดของเสาตรงจุดที่เปลี่ยนพฤติกรรมจากอีลาสติกเป็นอินอีลาสติก
C_d	=	ตัวคูณผลรูปร่าง (Shape factor)
C_{dyn}	=	ตัวคูณผลพลศาสตร์ (Dynamic response factor)
C_{exp}	=	ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (Exposure factor)
$C_{exp}(z)$	=	ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ความสูง z
C_g	=	ตัวคูณผลกระโชก (Gust factor)
C_{shp}	=	ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic shape factor)
C_{shp}^*	=	ตัวคูณผลรูปร่างทั้งหมดของเสาสายส่ง (Overall shape factor)
c	=	สเกลแฟคเตอร์
D	=	ความกว้างของชั้นส่วนโครงสร้างด้านที่ตั้งฉากกับลม
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า
E	=	ตัวประกอบสภาพพื้นผิว (Exposure factor)
E	=	โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)
e_x	=	ส่วนเชิงเส้นของความเครียดแนวแกน
F	=	แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- F_{cr} = หน่วยแรงอัดวิกฤติ เมื่อเกิดการโค้งงอเฉพาะที่ในแผ่นบาง
 F_y = จุดคลาก (Yield stress)
 F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้
 F_c = แรงบนสายไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับแนวสายไฟฟ้า
 F_{cr} = หน่วยแรงอัดวิกฤติ เมื่อเกิดการโค้งงอเฉพาะที่ในแผ่นบาง
 F_t = แรงลัพท์ที่กระทำกับเสาสายส่ง
 F_y = จุดคลาก (Yield stress)
 f_c = ความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า
 f_t = ความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง
 G_c = ตัวคูณการตอบสนองลมกระโชกสำหรับสายไฟฟ้า
 G_t = ตัวคูณการตอบสนองลมกระโชกสำหรับเสาสายส่ง
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
 g = ตัวประกอบทางสถิติ (Statistical factor)
 g_r = ตัวประกอบสูงสุดทางสถิติ (Statistical peak factor)
 h = ความสูงทั้งหมดของเสาสายส่ง
 h_c = ความสูงเฉลี่ยของสายไฟฟ้า
 h_t = ความสูงเฉลี่ยของเสาสายส่ง
 K = สัมประสิทธิ์ความฝืดพื้นผิว (Surface drag coefficient)
 K = ตัวประกอบความยาวประสิทธิผล
 K_t = ค่าคงที่สำหรับคาบการกลับ t ปี เมื่อคิดจากสถิติ t_0 ปี
 K_E = เมตริกซ์สติฟเนสอีลาสติกของโครงสร้าง (Elastic stiffness matrix)
 K_G = เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิตของโครงสร้าง (Geometric stiffness matrix)
 K_E^{j-1} = เมตริกซ์สติฟเนสอีลาสติกที่คิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งในรอบที่ $j-1$

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

K_G^{j-1}	=	เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิตที่คิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งและหน่วยแรงตามแนวแกนในรอบที่ $j-1$
k_e	=	เมตริกซ์สติฟเนสอีลาสติกของชิ้นส่วน
k_g	=	เมตริกซ์สติฟเนสเรขาคณิตของชิ้นส่วน หรือเมตริกซ์หน่วยแรงเริ่มต้น
L	=	ระยะระหว่างเสาสายส่ง (Typical span)
L	=	ความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่ถูกยึดรั้ง
LF	=	ส่วนประกอบแรงบนเสาสายส่งในทิศทางแนวสายไฟฟ้า
L_s	=	สเกลอินทิกรัลทางขวางของการแปรปรวน (Transverse integral scale of turbulence)
$\frac{L}{r}$	=	ความขรุขระของชิ้นส่วนโครงสร้าง
m	=	มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า
N	=	ฟังก์ชันแสดงรูปร่าง
P_0	=	แรงตามแนวแกนเริ่มต้น
P	=	แรงทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง
q	=	หน่วยแรงดัดลมที่กระทำต่อโครงสร้าง
q_c	=	หน่วยแรงดัดลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า
q_{ref}	=	หน่วยแรงดัดลมอ้างอิง
q_t	=	หน่วยแรงดัดลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง
Re	=	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
R_c	=	ส่วนของผลกำทอนของสายไฟฟ้า ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสายไฟฟ้า
R_t	=	ส่วนของผลกำทอนของเสาสายส่ง ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของเสาสายส่ง
r	=	รัศมีจายเรชั่นของหน้าตัด

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

\hat{r}	=	ผลสูงสุดเนื่องจากแรง (Peak loading effect)
\bar{r}	=	ผลเฉลี่ยเนื่องจากแรง (Mean loading effect)
\hat{r}_{PL_i}	=	ผลเนื่องจากแรงแพชโหลดที่ i เมื่อ $i = 1-4$
r	=	การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั่ว หรือดีกรีความอิสระที่พิจารณา
r^j	=	การเปลี่ยนตำแหน่งทั้งหมดของโครงสร้างที่คำนวณได้ในรอบที่ j
sag	=	ระยะตกท้องช้าง
T	=	แรงดึงในสายไฟฟ้า
TF	=	ส่วนประกอบแรงบนเสาสายส่งในทิศตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า
t	=	ความหนาของหน้าตัด
U	=	ผลรวมของพลังงานความเครียด
U_0	=	พลังงานความเครียดจากหน่วยแรงตามแนวแกนเริ่มต้น
U_1	=	พลังงานความเครียดเนื่องจากหน่วยแรงตัด
V	=	ความเร็วลมที่ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้าง
V_0	=	ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปีจากสถิติ t_0 ปี
V_c	=	ความเร็วลมที่กระทำต่อสายไฟฟ้า
V_h	=	ความเร็วลมที่ความสูง h ใดๆ
V_{ref}	=	ความเร็วลมอ้างอิง
V_t	=	ความเร็วลมที่กระทำต่อเสาสายส่ง
V_t	=	ความเร็วลมที่คิดที่คาบการกลับ t ปี
\bar{V}_{h_c}	=	ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของสายไฟฟ้า
\bar{V}_{h_t}	=	ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของเสาสายส่ง
v	=	ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง หรือระยะโก่งตัวของ เอเลเมนต์
W	=	หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง
w	=	ความกว้างของหน้าตัด
w	=	น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

z	=	ความสูงที่วัดความเร็วลม
z_0	=	ระยะความขรุขระ (Roughness length)
z_g	=	ความสูงเกรเดียนท์ (Gradient height)
z_i	=	ความสูงเฉลี่ยของแรงแพชโหลดที่ i
α	=	ดัชนียกกำลัง ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ
ε	=	ค่าคงที่ 0.75 เป็นค่าที่ใช้ประมาณ $(A^2 + B^2)^{1/2} \approx \varepsilon(A+B)$ เมื่อ A, B มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน
ε_x	=	ความเครียดทั้งหมด
ε_{x1}	=	ความเครียดดัด (Flexural strain)
ε_{x2}	=	ความเครียดแนวแกน (Axial strain)
σ	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี
σ_r	=	รากที่สองของค่าเฉลี่ยของกำลังสองของผลเนื่องจากแรง (RMS loading effect)
σ_{x0}	=	หน่วยแรงตามแนวแกนเริ่มต้น (Initial axial stress,)
σ_{x1}	=	หน่วยแรงดัด (Flexural stress)
σ_{x1}^{\sim}	=	หน่วยแรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้น (Axial stress increment)
ϕ	=	ค่าสัดส่วนความทึบ (Solidity ratio)
ψ	=	มุมที่ลมกระทำกับโครงสร้างวัดจากเส้นตั้งฉากแนวสายไฟฟ้า
ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ
ζ_c	=	อัตราส่วนความหน่วงของสายไฟฟ้า (Damping ratio)
ζ_t	=	อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ของเสาสายส่ง
η_x	=	ส่วนไม่เชิงเส้นของความเครียดแนวแกน