

ผลของการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง

FIBER OPTIC CABLE AND RADIUS OF CURVATURE EFFECTS ON
THE ELECTRICAL POWER TOWER

กัมปนาท นามงาม
KAMPANAT NAMNGAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-35-0

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง

FIBER OPTIC CABLE AND RADIUS OF CURVATURE EFFECTS ON THE
ELECTRICAL POWER TOWER

กัมปนาท นามงาม
KAMPANAT NAMNGAM

เลขหมู่.....
เลขที่..... 47856
วัน, เดือน, ปี 27 ส.ค. 2546

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2545

ISBN 974-9546-35-0

**FIBER OPTIC CABLE AND RADIUS OF CURVATURE EFFECTS ON THE
ELECTRICAL POWER TOWER**

KAMPANAT NAMNGAM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED MATHEMATICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-9546-35-0

COPYRIGTH 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการ โต้้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง
นักศึกษา	นายกัมปนาท นามงาม
รหัสประจำตัว	42065301
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์ประยุกต์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ภักคินี ชิตสกุล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษากำลังแสงที่เหมาะสมที่ส่งผ่านไปตามสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูงซึ่งอยู่ในพจน์ของรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และกำลังแสงที่ได้รับ โดยอาศัยหลักของการแปรผันทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น แคลคูลัสของการแปรผัน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะใช้เป็นพื้นฐานในการหาค่ากำลังแสงที่ได้รับและการใช้งบประมาณที่เหมาะสม ผลเฉลยที่เสถียรจะนำมาใช้กับการรบกวนเล็กน้อยในพจน์ของความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ผลลัพธ์ข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่ากำลังแสงที่ได้รับยังคงใช้ได้บนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง การรบกวนเล็กน้อยและผลของอุณหภูมิเป็นประเด็นที่น่าสนใจซึ่งนักวิจัยท่านอื่นสามารถนำงานวิจัยนี้ไปใช้ในการศึกษาต่อไปได้

Thesis Title	Fiber Optic Cable and Radius of Curvature Effects on the Electrical Power Tower
Student	Mr.Kampanat Namngam
Student ID.	42065301
Degree	Master of Science
Programme	Applied Mathematics
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Pakkinee Chitsakul
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Preecha Yupapin

ABSTRACT

The optimum of power transmission in optical fiber cable hanging on the electrical power tower, in term of cable radius of curvature, tower span and power transmission gain output are investigated. The mathematical model is predicted by conventional variation principle i.e. calculus of variation, where the modeling is based on the optimum in output gain and cost. The stability of the solution with small perturbation in term of cable lengthening is demonstrated. Preliminary results have shown that the output gain is still valid to use in transmission lines. The small vibration and temperature effects are the subject for our continuing work.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัคคินี ชิตสกุล ที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางด้าน
คณิตศาสตร์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางด้านฟิสิกส์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กฤษณา ไตรสุรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ
และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพโรบลย์ พันธรักษ์พงษ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์
ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้อง ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน

ขอขอบพระคุณ คุณแม่และพี่สาวที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา และญาติทุกท่านที่ให้
กำลังใจมาโดยตลอด

กัมปนาท นามงาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
ศัพท์บัญญัติ.....	X
สัญลักษณ์.....	XII
คำนำ.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
2.1.1 การลดทอน.....	5
2.1.1.1 การคัดกลั่นของวัตถุ.....	5
2.1.1.2 การคัดกลั่นจากภายนอก.....	5
2.1.1.3 การสะท้อนเรย์ลี.....	6
2.1.1.4 การสูญเสียจากการโค้งงอ.....	6
2.1.1.5 การลดทอนและวัสดุใยแก้ว.....	8
2.1.1.6 สเปกตรัมของการลดทอน.....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2 รัศมีความโค้ง.....	8
2.1.3 ทฤษฎีบทของเทเลอร์.....	9
2.1.4 อนุกรม.....	10
2.1.5 ค่าสุดขีดของฟังก์ชันตัวแปรเดียว.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 คำและสมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y	14
3.1.1 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง.....	15
3.1.2 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน.....	16
3.1.3 แรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง.....	17
3.1.4 รัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน.....	19
3.1.5 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน.....	21
3.1.6 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	22
3.1.7 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวน.....	23
3.1.8 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย.....	23
3.2 วิธีการจำลอง.....	23
3.3 วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	24
3.4 การรบกวนเล็กน้อย.....	29
3.4.1 การรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	32
3.4.2 การรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	36
บทที่ 4 ผลของงานวิจัย.....	42
4.1 ผลของงานวิจัย.....	42
4.1.1 ผลของวิธีการจำลอง.....	42
4.1.2 ผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	46
4.1.3 ผลของการรบกวนเล็กน้อย.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3.1 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	51
4.1.3.2 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	60
4.2 เปรียบเทียบผลของงานวิจัย.....	77
4.2.1 เปรียบเทียบผลของวิธีการจำลอง.....	77
4.2.2 เปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	81
4.2.3 เปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	84
บทที่ 5 สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
5.1 สรุปผลของงานวิจัย.....	90
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลของวิธีการจำลอง.....	44
4.2 ผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	49
4.3 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.1$	54
4.4 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.3$	56
4.5 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.5$	58
4.6 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 1^\circ$	62
4.7 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 2^\circ$	64
4.8 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 3^\circ$	66
4.9 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 1^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม.....	71
4.10 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 2^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม.....	73
4.11 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 3^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสง.....	1
1.2 เส้นโค้งแคทีนารี.....	2
2.1 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ.....	7
2.2 เส้นโค้งแคทีนารี.....	12
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน.....	15
3.2 แรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่จุดแขวน.....	17
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนเล็กน้อย.....	29
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง.....	32
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของเสาไฟฟ้าแรงสูงแบบที่ 1.....	36
3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของเสาไฟฟ้าแรงสูงแบบที่ 2.....	40
4.1 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	77
4.2 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	78
4.3 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	78
4.4 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	79
4.5 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	79
4.6 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	80
4.7 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	80
4.8 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	81
4.9 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	82
4.11 ความยาวของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	82
4.12 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	83
4.13 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	83
4.14 ร้อยละของแรงดึงของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อยเชิงวิเคราะห์.....	84
4.15 ระยะตกท้องข้างขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	84
4.16 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	85
4.17 ความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	85
4.18 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	86
4.19 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	86
4.20 ร้อยละของแรงดึงของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการเอียง.....	87
4.21 ระยะตกท้องข้างขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	87
4.22 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	88
4.23 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	88
4.24 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	89

ศัพท์บัญญัติ

การโค้งงอชนิดจุดภาค	Microbend
การโค้งงอชนิดมหภาค	Macrobend
การรบกวนเล็กน้อย	Perturbation
การสูญเสียแบบโค้งงอ	Bending Loss
ค่าการสูญเสียกำลังแสง	Transmission Losses
ค่าขีดสุดสัมพัทธ์	Local Extremum
ค่าความโค้ง	Curvature
ค่าต่ำสุดสัมบูรณ์	Absolute Minima
ค่าต่ำสุดสัมพัทธ์	Local Minimum
ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน	Attenuation Coefficient
ค่าสูงสุดสัมบูรณ์	Absolute Maxima
ค่าสูงสุดสัมพัทธ์	Local Maximum
เครือข่ายความเร็วสูง	High Speed LAN
เครือข่ายท้องถิ่น	Local Area Network, LAN
จุดวิกฤติ	Critical Point
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	Mathematical Modeling
ผลบวกย่อย	Partial Sum
พี ซี เอส	Plastic Clad Silica, PCS
ใยแก้วฟลูออไรด์	Fluoride Glass Fiber
ระบบหน่วยสากล	International of Units, SI
รัศมีความโค้ง	Radius of Curvature
แรงดึง	Tension
วิธีการจำลอง	Simulation Method
วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์	Analytic Solution Method
สมการอดิศัย	Transcendental Equation
สมมาตร	Symmetry
สายเคเบิลใยแก้วนำแสง	Fiber Optic Cable
เส้นโค้งแคทีนารี	Catenary Curve
เส้นใยพลาสติก	Plastic Fiber

ศัพท์บัญญัติ (ต่อ)

อัลตราไวโอเลต

Ultraviolet

อินฟราเรด

Infrared

โอเวอร์โทน

Overtone

ไฮดรอกซิล

Hydroxyl

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
a_0	รัศมีของแกนใยแก้ว
c	ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยาว
c_p	ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
d	ความหนาแน่นของสายเคเบิล
D	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง
E_b	ค่าอิลาสติกโมดูลัสของใยแก้ว
E_f	ค่าอิลาสติกโมดูลัสของเคเบิล
g	แรงโน้มถ่วง
h	ระยะตกท้องช่วงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง
h_0	ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ
h_p	ระยะตกท้องช่วงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
l	ครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน
l_p	ครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
L_f	การสูญเสียจากไมโครเบนด์
<i>loop storage</i>	ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง
<i>loop storage_p</i>	ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
$loss_{curve}$	ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้ง
$loss_{curve_p}$	ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
<i>loss per unit length</i>	ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย
<i>loss per unit length_p</i>	ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
N	จำนวนโคงของการ โคงงต่อความยาว
P_i	กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
P_o	กำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง
R	รัศมีของการ โคงง
T	แรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง
T_P	แรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
w	น้ำหนักของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย
x	ครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง
x_P	ครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
y	ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง
y_P	ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
α	ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน
α_R	ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนชนิดเรย์ลี
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	ผลจากการรบกวนเล็กน้อยแบบต่างๆ
γ	การสูญเสียจากแมคโครเบนด์
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$	ระยะการรบกวนเล็กน้อยแบบต่างๆ
λ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง
κ	ค่าความโคงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน
ρ	รัศมีความโคงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน
Δ	ผลต่างของดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลด
τ	มุมที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย
η	ความสูงขณะที่แขวนซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย

คำนำ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาผลของการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูงโดยอาศัยวิธีการจำลอง วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และศึกษาผลของการรบกวนเล็กน้อยจากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

งานวิจัยฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ประกอบด้วย ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น และคำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 วิธีคำนวณงานวิจัย ประกอบด้วย ค่าและสมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยึดแบบสมมาตรกับแนวแกน y วิธีการจำลอง วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และการรบกวนเล็กน้อย

บทที่ 4 ผลของงานวิจัย ประกอบด้วย ผลของงานวิจัยและเปรียบเทียบผลของงานวิจัย

บทที่ 5 สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ ประกอบด้วย สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

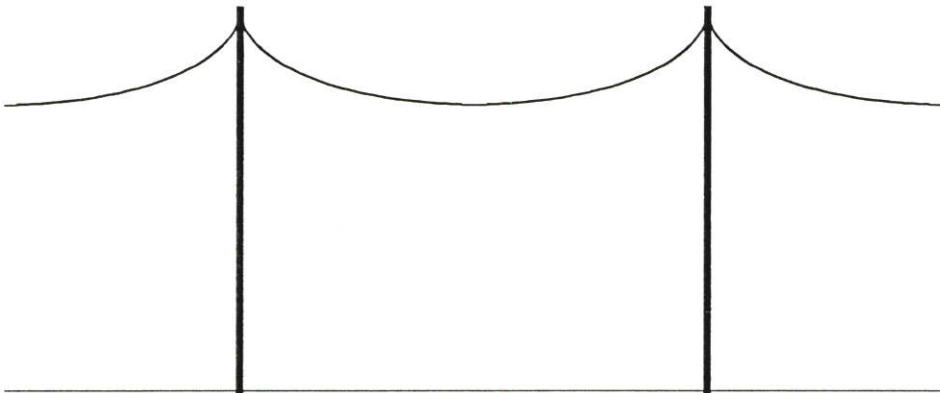
ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านการสื่อสารมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ได้มีการนำสายเคเบิลใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable) มาใช้แทนสายสัญญาณที่มีใช้กันอยู่เดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารให้ดีขึ้น สิ่งหนึ่งที่น่าสนใจศึกษาคือผลของการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูงและค่าการสูญเสียกำลังแสง (Transmission Losses) ที่ส่งผ่านไป ตามสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นจากน้ำหนักของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจะมีผลกับ ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 1.1 การติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

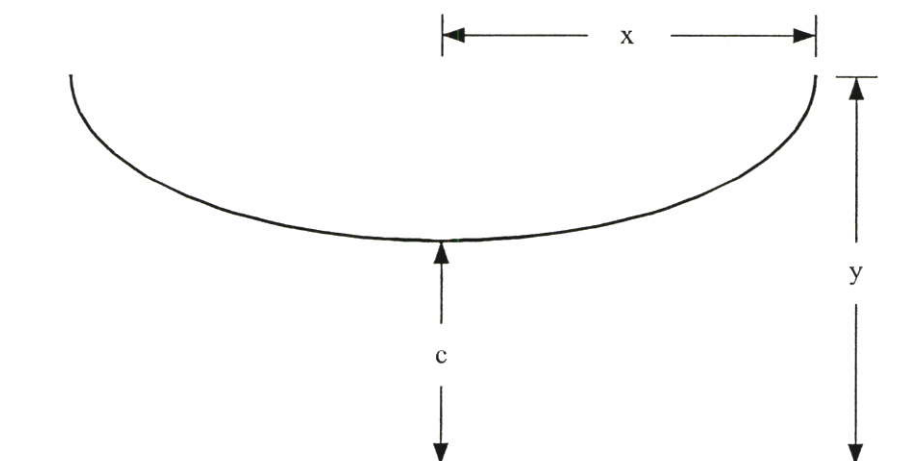
งานวิจัยฉบับนี้ สามารถนำไปประยุกต์ในทางฟิสิกส์ วิศวกรรม และเทคโนโลยีด้านการสื่อสารเพื่อช่วยในการวางแผนและออกแบบการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงบนเสาไฟฟ้าแรงสูงเพื่อประหยัดงบประมาณและสามารถทราบค่าต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อที่จะทราบค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ส่งผ่านไปตามสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อช่วยในการวางแผนและออกแบบการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงบนเสาไฟฟ้าแรงสูงเพื่อประหยัดงบประมาณ
3. เพื่อที่จะทราบ ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง
4. เพื่อนำไปพัฒนาและประยุกต์ในทางฟิสิกส์ วิศวกรรม และเทคโนโลยีด้านการสื่อสาร

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูงมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแคทีนารี (Catenary Curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงและความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 1.2 เส้นโค้งแคทีนารี

สมการแคทินารี คือ

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (1.1)$$

โดยที่

x คือ ครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

c คือ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

ถ้า กำหนดให้ x คือค่าคงที่ และ c คือจำนวนจริงบวก แล้ว y คือความสูงขณะที่แขวน ณ ตำแหน่งครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง x

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ส่งผ่านไปตามสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาผลของการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง
3. ศึกษาผลจากการรบกวนเล็กน้อย

1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเอกสารและข้อมูลที่รวบรวมได้
3. ศึกษาค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ส่งผ่านไปตามสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูงและผลของการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยวิธีการจำลอง (Simulation Method) และวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytic Solution Method)
4. ศึกษาผลจากการรบกวนเล็กน้อย (Perturbation)
5. สรุปและเรียบเรียงงานวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) กับแนวแกน y

1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย [1]

สมการแคทีนารี คือ สมการที่แทนเส้นโค้งของสายเคเบิลขณะที่แขวนภายใต้น้ำหนักของสายเคเบิลเองด้วยจุดสองจุด ถ้าจุดต่ำสุดของสมการแคทีนารี คือ $(0, c)$ แล้วสมการแคทีนารีเขียนได้เป็น

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (1.2)$$

โดยที่

$$c > 0$$

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 การลดทอน [2-3]

กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (P_i) ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงยาว L กิโลเมตร แล้วกำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง (P_o) เมื่อพิจารณาที่ $P_o < P_i$ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient, α) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร แทนด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\alpha L = -10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad (2.1)$$

เมื่อการลดทอนกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงนั้นมีผลมาจากการดูดกลืนแสงของในส่วนของแกนหรือแคลด การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง

2.1.1.1 การดูดกลืนของวัตถุ

พิจารณาการดูดกลืนในแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ จะเห็นว่าแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อยในช่วงของความยาวคลื่นระหว่าง 0.8-1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกเพื่อใช้งานทางด้านการสื่อสาร การดูดกลืนมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วงของอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV)

2.1.1.2 การดูดกลืนจากภายนอก

การลดทอนของแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้เกิดจากการที่สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงหรือแก้วนั้นมีสารอื่นเจือปนอยู่ทำให้เกิดการดูดกลืนของแสงขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากแก้วและสารเจือปน เทคนิคในการผลิตใยแก้วนำแสงสมัยใหม่นั้นสามารถลดอิออนของสารเจือปนของสารพวกนี้ได้จนถึงระดับที่ไม่มีผลต่อการดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามอิออนดูดกลืนตัวหนึ่งที่ไม่สามารถขจัดได้ก็คือ ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH) จุดยอดของการสั่นพื้นฐานของอิออนไฮดรอกซิลจะเกิดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 2.27 ไมครอน และพื้นฐานการสั่นที่ 4.2 ไมครอน ซึ่งการสั่นพื้นฐานนี้จะทำให้เกิดโอเวอร์โทน (Overtone) ที่ฮาร์มอนิกต่างๆ ดังนี้ 1.38,

0.95 และ 0.72 ไมครอน และเมื่อรวมระหว่างการสันพื้นฐานและโอเวอร์โทนจะได้จุดยอดที่ 1.24, 1.13 และ 0.88 ไมครอน ตามลำดับ

2.1.1.3 การสะท้อนเรย์ลี

การดูดกลืนของใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งขึ้นอยู่กับ การสะท้อนของแสงที่เกิดจาก ใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนชนิดเรย์ลี (Rayleigh, α_R) จะเท่ากับ $\frac{1}{\lambda^4}$ ของค่าการสูญเสียของกำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนเรย์ลีนั้น

2.1.1.4 การสูญเสียจากการโค้งงอ

การสูญเสียแบบโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การโค้งงอชนิดมหภาคหรือ แมคโครเบนด (Macrobend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาค หรือไมโครเบนด (Microbend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร การโค้งงอชนิดแมคโครเบนดจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดม้วน เนื่องมาจากการโค้งงอตามมุมต่างๆ การเกิด การสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอแบบนี้รังสีของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วตรงบริเวณที่โค้งงอ ซึ่ง ทำให้แสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกนและแคลดที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตจึงทำให้รังสีของ แสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.1

พิจารณาการสูญเสียจากไมโครเบนด คือ

$$L_f = N \langle h_0^2 \rangle \frac{a_0^4}{D^6 \lambda^3} \left(\frac{E_b}{E_f} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

โดยที่

N คือ จำนวนโค้งของการโค้งงอต่อความยาว

h_0 คือ ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของเคเบิลใยแก้วนำแสง

a_0 คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

E_b คือ ค่าอีลาสติก โมดูลัสของใยแก้ว

E_f คือ ค่าอีลาสติก โมดูลัสของเคเบิล

พิจารณาการสูญเสียจากแมคโครเบนด์ คือ

$$\gamma = 10 \log \frac{\alpha + 2}{(2\alpha)(a_0/R\Delta)} \quad (2.3)$$

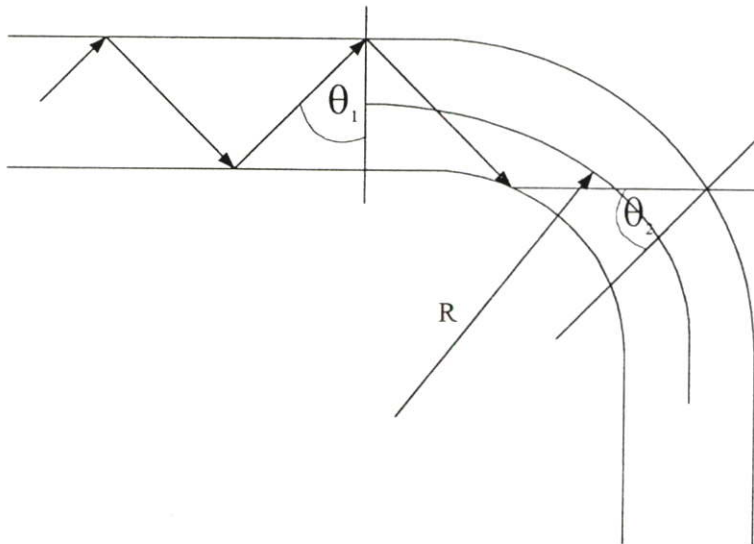
โดยที่

Δ คือ ผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลด

R คือ รัศมีของการโค้งงอ

a_0 คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน



θ_1 และ θ_2 คือมุมตกกระทบของลำแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.1 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ

การสูญเสียของกำลังแสงจะมีค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลดมีค่ามากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วชนิดโหมคเดียวที่ทำงานที่ความยาวคลื่นยาวๆจะไวต่อการสูญเสียจากการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกพันรอบแกนม้วนที่มีรัศมี 10 เซนติเมตร ซึ่งนับว่าสั้นนั้นก็ยังสามารถแก้ไขได้โดยการตัดใยแก้วนำแสงส่วนที่โค้งงอทิ้งไปได้ การโค้งงอชนิดไมโครเบนด์เกิดจากการไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างเรขาคณิตของใยแก้วนำแสงในกระบวนการผลิต เช่น รัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกนและแคลดที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการกระบวนการผลิต นอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้มีแสงบางส่วนกระจายออกมาจากใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

2.1.1.5 การลดทอนและวัสดุใยแก้ว

พี ซี เอส (Plastic Clad Silica, PCS) เป็นเส้นใยแก้วที่มีการสูญเสียสูงมากซึ่งเป็นผลเนื่องจากการดูดกลืนของแคลด ทั้งนี้เพราะเส้นใยพลาสติก (Plastic Fiber) จะมีการสูญเสียมากที่สุด

ใยแก้วฟลูออไรด์ (Fluoride Glass Fiber) จะมีการสูญเสียในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดที่มีค่าต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ จึงทำให้สามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 1.6 ไมครอน ขณะเดียวกันก็สามารถลดการสะท้อนเรย์ลีที่ความยาวคลื่นยาวๆ ได้ด้วย

2.1.1.6 สเปกตรัมของการลดทอน

สเปกตรัมของการลดทอนของช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการสูญเสียต่ำจะมีอยู่ 3 ช่วงคือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 850, 1300 และ 1550 นาโนเมตร ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างกัน คือที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร นั้นจะใช้กับเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) และการตรวจวัด ส่วนที่ความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร จะใช้กับเครือข่ายความเร็วสูง (High Speed LAN) และการสื่อสาร ส่วนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะใช้กับงานด้านการสื่อสาร

2.1.2 รัศมีความโค้ง [1, 4]

สมการเวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม $\vec{r}(t)$ ของเส้นกราฟ C คือ

$$\vec{r}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} + z(t)\hat{k} \quad (2.4)$$

สามารถหาเวกเตอร์สัมผัส $\vec{T}(t)$ ณ แต่ละจุดบน C ซึ่งเวกเตอร์สัมผัส ณ แต่ละจุดนี้จะชี้ทิศทางเดียวกับทางเดินของ C

กำหนดให้ C เป็นเส้นกราฟเรียบ ทิศทางของเส้นสัมผัสจะเปลี่ยนจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นโค้ง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นสัมผัส \vec{T} เทียบกับความยาวของเส้นกราฟ S จะมีความสัมพันธ์กับการบิด หัก และการหมุนของเส้นกราฟ ดังนี้

เนื่องจาก

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \frac{d\vec{T}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{T}}{ds} &= \frac{d\bar{T}/dt}{ds/dt} \\ &= \frac{d\bar{T}/dt}{\|d\bar{r}/dt\|}\end{aligned}\quad (2.6)$$

นิยาม 2.1 กำหนดให้ C เป็นเส้นโค้งเรียบซึ่งเกิดจากสมการเวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม $\bar{r}(t)$ ซึ่ง $\bar{r}'(t)$ ต่อเนื่อง ถ้า $\bar{T}(t)$ เป็นเวกเตอร์สัมผัสหนึ่งหน่วยของเส้นโค้ง C ที่จุด $\bar{r}(t)$, s เป็นความยาวจากจุดที่เลือกบนเส้นโค้ง C ถึงจุด $\bar{r}(t)$ และความยาว s เพิ่มขึ้นเมื่อตัวแปรเสริม t เพิ่มขึ้น แล้วความโค้ง (Curvature) ของเส้นโค้ง C ที่จุด $\bar{r}(t)$ คือขนาดของเวกเตอร์ความโค้งของเส้นโค้ง C ที่จุด $\bar{r}(t)$ เขียนแทนด้วย $\kappa(t)$ นิยามโดย

$$\kappa(t) = \frac{\|\bar{T}'(t)\|}{\|\bar{r}'(t)\|} = \frac{\|d\bar{T}/dt\|}{\|d\bar{r}/dt\|} = \left\| \frac{d\bar{T}}{ds} \right\| \quad (2.7)$$

นิยาม 2.2 ถ้า $\kappa(t)$ เป็นความโค้งของเส้นโค้ง C ที่จุด $\bar{r}(t)$ และ $\kappa(t) \neq 0$ แล้ว รัศมีความโค้ง (Radius of Curvature) ของ C ที่จุด $\bar{r}(t)$ เขียนแทนด้วย $\rho(t)$ นิยามโดย

$$\rho(t) = \frac{1}{\kappa(t)} \quad (2.8)$$

2.1.3 ทฤษฎีบทของเทเลอร์ [5]

สำหรับฟังก์ชัน $f(x)$ ใดๆ ซึ่งมีอนุพันธ์อันดับที่ $N+1$ ในช่วง $(x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon)$ ฟังก์ชัน $f(x)$ สามารถกระจายในเทอมของ $(x - x_0)$ ได้เป็น

$$\begin{aligned}f(x) &= f(x_0) + (x - x_0) \frac{df(x_0)}{dx} + \frac{(x - x_0)^2}{2!} \frac{d^2 f(x_0)}{dx^2} + \dots + \\ &\quad \frac{(x - x_0)^N}{N!} \frac{d^N f(x_0)}{dx^N} + R_N\end{aligned}\quad (2.9)$$

โดยที่

$$R_N = \frac{(x - x_0)^{N+1}}{(N + 1)!} \frac{d^{N+1} f(z)}{dx^{N+1}} \quad (2.10)$$

โดยที่ z อยู่ระหว่าง x_0 กับ x

กรณี $x_0 = 0$ สมการ (2.10) และ (2.11) กลายเป็น

$$f(x) = f(0) + x \frac{df(0)}{dx} + \frac{x^2}{2!} \frac{d^2 f(0)}{dx^2} + \dots + \frac{x^N}{N!} \frac{d^N f(0)}{dx^N} + R_N \quad (2.11)$$

โดยที่

$$R_N = \frac{x^{N+1}}{(N+1)!} \frac{d^{N+1} f(z)}{dx^{N+1}} \quad (2.12)$$

โดยที่ z อยู่ระหว่าง 0 กับ x

2.1.4 อนุกรม [6]

กำหนดให้ $\{u_n\}$ เป็นลำดับของจำนวนจริง ให้ $S_n = u_1 + u_2 + \dots + u_n$ เรากล่าวได้ว่าลำดับ $\{S_n\}$ เป็นอนุกรมหรืออนุกรมอนันต์ที่มีผลบวกย่อย (Partial Sum) S_1, S_2, S_n, \dots เราเรียก u_n ว่าเทอมที่ n ของอนุกรม จะเขียนแทนอนุกรมนี้โดย $u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots$ หรือ $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$

ถ้า u_n มีค่าเป็นบวกทุกเทอม n แล้วลำดับของผลบวกย่อย $S_n = \sum_{k=1}^n u_k$ จะเป็นลำดับที่

ไม่ลดลง

ทฤษฎีบท 2.1 กำหนดให้ $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ เป็นอนุกรมที่มีเทอมเป็นบวกจะได้ว่า $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ เป็นลำดับลู่เข้า ถ้าลำดับของผลบวกย่อยมีขอบเขต

ทฤษฎีบท 2.2 (การทดสอบอัตราส่วน) ถ้า $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ เป็นอนุกรมที่มีเทอมเป็นบวก และ

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = p \text{ แล้ว}$$

1. $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ จะเป็นอนุกรมลู่เข้า ถ้า $p < 1$
2. $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ จะเป็นอนุกรมลู่ออก ถ้า $p > 1$ หรือ $p = \infty$

2.1.5 ค่าสุดขีดของฟังก์ชันตัวแปรเดียว [7]

ถ้า f เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเดียว x ซึ่งนิยามบนช่วง I กล่าวว่

1. f มีค่าสูงสุดสัมพัทธ์ (Local Maximum) ที่ x_0 ซึ่งอยู่ภายใน I ถ้า $f(x) \leq f(x_0)$ สำหรับทุก x ในบางย่านของ x_0
2. f มีค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ (Local Minimum) ที่ x_0 ซึ่งอยู่ภายใน I ถ้า $f(x) \geq f(x_0)$ สำหรับทุก x ในบางย่านของ x_0
3. ค่าสูงสุดสัมพัทธ์และค่าต่ำสุดสัมพัทธ์รวมเรียกว่า ค่าสุดขีดสัมพัทธ์ (Local Extrema)
4. f มีค่าสูงสุดสัมบูรณ์ (Absolute Maxima) หรือ ค่าต่ำสุดสัมบูรณ์ (Absolute Minima) ที่ x_0 ใน I ถ้า $f(x) < f(x_0)$ หรือ $f(x) > f(x_0)$ ตามลำดับสำหรับทุกค่าของ x ใน I

ทฤษฎีบท 2.3 ถ้า f เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่นิยามบนช่วง I แล้ว

1. ค่าสุดขีดสัมพัทธ์ของ f ถ้ามีจะอยู่ที่จุดวิกฤติ (Critical Point) ของ f ซึ่งอยู่ภายใน I เมื่อ $f' = 0$ หรือ f' หาค่าไม่ได้
2. ค่าสูงสุดสัมบูรณ์และค่าต่ำสุดสัมบูรณ์ของ f อาจอยู่ที่จุดวิกฤติของ f หรือที่จุดขอบของช่วงที่เป็นโดเมนของ f

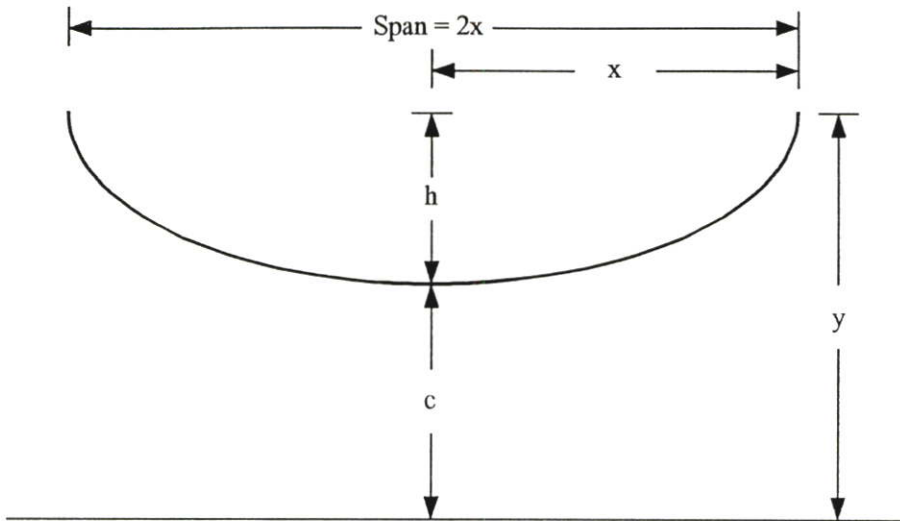
ทฤษฎีบท 2.4 กำหนดให้ f เป็นฟังก์ชันที่หาอนุพันธ์ได้บนบางช่วงเปิด I ให้ x_0 เป็นจุดวิกฤติของ f ภายใน I เมื่อ $f'(x_0) = 0$

ถ้า $f'(x_0) = f''(x_0) = \dots = f^{(k+1)}(x_0) = 0$ และ $f^{(k)}(x_0) \neq 0$ แล้ว

1. ถ้า k เป็นเลขคี่แล้วกราฟของ f มีจุดเปลี่ยนเว้าที่ $x = x_0$
2. ถ้า k เป็นเลขคู่แล้วที่ $x = x_0$
 - 2.1 เป็นค่าสูงสุดสัมพัทธ์ ถ้า $f^{(k)}(x_0) < 0$
 - 2.2 เป็นค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ ถ้า $f^{(k)}(x_0) > 0$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ.1989 , Cecil W. Koehler ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเส้นโค้งแคทีนารี [8] โดยที่ กำหนดให้ $x = 30$ และ $h = 1 - 40$



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งแคทีนารี

จากรูปที่ 2.2 สมการเส้นโค้ง คือ

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (2.13)$$

และ

$$y = h + c \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.13) และ (2.14) ได้ว่า

$$h + c = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (2.15)$$

หรือ

$$\frac{h}{c} + 1 = \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (2.16)$$

เนื่องจาก สมการ (2.16) เป็นสมการอดิศัย (Transcendental Equation) ดังนั้น ค่า c ที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณ

ปี ค.ศ. 2001 , Yo-soeb Lee และ Soon-ill Hong ทำการศึกษาแรงตึง (Tension) ของสายเคเบิลที่ถูกแขวนโดยมอเตอร์ [9] ในงานวิจัยดังกล่าวได้เสนอสมการแรงตึงของสายเคเบิลและสมการความยาวของสายเคเบิล ดังนี้

$$\begin{aligned} T &= ldg \frac{\sqrt{1+y'^2}}{2y'^2} \\ &= cdg \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{c}\right)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

และ

$$\begin{aligned} l &= \int_{-x}^x \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{c}\right)} dx \\ &= 2c \sinh\left(\frac{x}{c}\right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยที่

d คือ ความหนาแน่นของสายเคเบิล

g คือ แรงโน้มถ่วง

$c > 0$

บทที่ 3

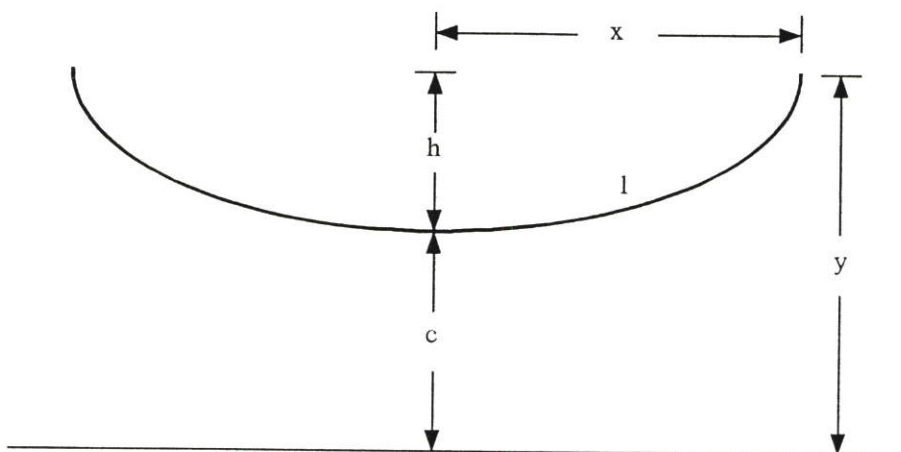
วิธีดำเนินงานวิจัย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และทางด้านอื่นๆ สามารถช่วยให้นักวิจัยทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาและแก้ปัญหาเหล่านั้นได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยฉบับนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y และสมการแคทีนารีจะมีส่วนช่วยในการอธิบายการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงให้เข้าใจและเห็นภาพมากขึ้น

ในบทนี้ จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y และสมการแคทีนารีมาช่วยในการศึกษาค่าต่างๆ เช่น ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะคกท้องช่วงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวน ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้วิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ซึ่งผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้จะนำมาใช้ในการศึกษาการรบกวนเล็กน้อย

3.1 ค่าและสมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการพิจารณาค่าและสมการต่างๆที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y และสมการแคทีนารีซึ่งเป็นสมการของเส้นโค้งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y เพื่อที่จะนำค่าและสมการต่างๆที่ได้ไปใช้ในการพิจารณาค่าอื่นๆที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากการพิจารณาโดยใช้วิธีการจำลอง วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้จะนำมาใช้ในการศึกษาการรบกวนเล็กน้อยซึ่งจะเสนอในหัวข้อต่อไป ฉะนั้นจะแบ่งการพิจารณาค่าและสมการต่างๆเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

โดยที่

x คือ ครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

h คือ ระยะดกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

c คือ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

l คือ ครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

y คือ ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

3.1.1 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

ถ้ากำหนดให้สมการแคทินารีเป็นสมการของตัวแปร c เมื่อ x คือค่าคงที่ แล้วสมการแคทินารีนี้จะเป็นระยะในแนวแกน y สำหรับแต่ละ x จากความสัมพันธ์นี้ จึงสามารถเขียนสมการความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงได้เป็นสมการแคทินารี

จากรูปที่ 3.1 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3.1)$$

โดยที่

x คือ ค่าคงที่

$c > 0$

3.1.2 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวน

การพิจารณาครั้งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงนั้น จะพิจารณาได้จากสมการความยาวของเส้นโค้ง คือ

$$l = \int_0^x \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (3.2)$$

เนื่องจาก y คือสมการแคทินารี และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการแคทินารีเทียบกับตัวแปร x คือ

$$y' = \sinh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3.3)$$

ดังนั้น ครั้งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

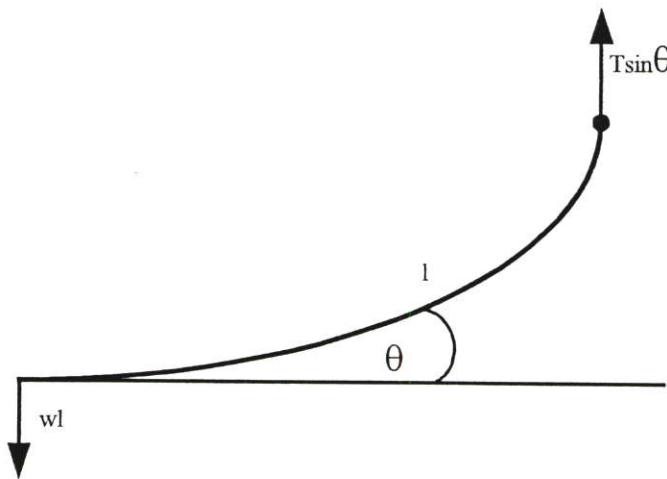
$$\begin{aligned} l &= \int_0^x \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{c}\right)} dx \\ &= \int_0^x \cosh\left(\frac{x}{c}\right) dx \\ &= c \sinh\left(\frac{x}{c}\right) \Big|_{x=0}^x \\ &= c \sinh\left(\frac{x}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

จากสมการครั้งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.4) ถ้ากำหนดให้ x คือครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นค่าคงที่ แล้ว ครั้งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง จะเปลี่ยนไปตามตัวแปร c คือความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นแขวน

3.1.3 แรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสง

งานวิจัยฉบับนี้ จะไม่มีการพิจารณาแรงอันเนื่องมาจากการรบกวนของแรงลม การสั่นสะเทือน และแรงอันเนื่องมาจากการรบกวนอื่นๆ ฉะนั้น จะพิจารณาเฉพาะแรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงที่จุดแขวนเพียงจุดเดียว

เนื่องจาก การติดตั้งสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงเป็นการแขวนแบบสมมาตรกับแนวแกน y ดังนั้น แรงที่กระทำในแนวแกน x จะหักล้างกันหมด จึงพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำในแนวแกน y ซึ่งจะมีแรงที่กระทำกับสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงขณะที่แขวนสองแนวแรงคือแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงขณะที่แขวนและแรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงที่จุดแขวน



รูปที่ 3.2 แรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงที่จุดแขวน

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า มีแรงในแนวแกน y สองแนวแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงขณะที่แขวนและแรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงที่จุดแขวน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T \sin \theta = wl \quad (3.5)$$

โดยที่

T คือ แรงดึงของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสง

w คือ น้ำหนักของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย

l คือ ครึ่งความยาวของสายเคเบิลโยก้าน้ำแสงขณะที่แขวน

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาค่า $\sin \theta$ จาก

$$\begin{aligned}
 \sin \theta &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2}} \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2}} \\
 &= \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

แทนค่า $\sin \theta$ จากสมการ (3.6) ในสมการ (3.5) ได้เป็น

$$T \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} = wl \tag{3.7}$$

จัดรูปสมการ (3.7) ได้เป็น

$$T = wl \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{y'} \tag{3.8}$$

จากสมการ (3.3) และ (3.4) ได้ว่า $y' = \sinh\left(\frac{x}{c}\right)$ และ $\frac{l}{\sinh\left(\frac{x}{c}\right)} = c$ ตามลำดับ

ดังนั้น สมการ (3.8) กลายเป็น

$$T = wc \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{c}\right)} \tag{3.9}$$

และเนื่องจาก $y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) = c \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{c}\right)}$

ดังนั้น สมการ (3.9) กลายเป็น

$$T = wy \quad (3.10)$$

จากสมการแรงตึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง (3.10) เนื่องจาก w คือเป็นน้ำหนักของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้น แรงตึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจะแปรผันตรงกับความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

3.1.4 รัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

พิจารณารัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน จากสมการ

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3.11)$$

โดยที่

c คือ ค่าคงที่ และ $c > 0$

การพิจารณารัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนนั้น ทำได้โดยแปลงสมการ (3.11) ให้เป็นสมการเวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม t จากสมการ (3.11) ถ้ากำหนดให้ $x = t$ แล้ว $y = c \cosh\left(\frac{t}{c}\right)$ ดังนั้น เวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม $\vec{r}(t)$ ของสมการ (3.11) คือ

$$\begin{aligned} \vec{r}(t) &= x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} \\ &= t\hat{i} + c \cosh\left(\frac{t}{c}\right)\hat{j} \end{aligned} \quad (3.12)$$

และ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม $\vec{r}(t)$ คือ

$$\vec{r}'(t) = \hat{i} + \sinh\left(\frac{t}{c}\right)\hat{j} \quad (3.13)$$

และ ขนาดของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์เชิงตัวแปรเสริม $\vec{r}'(t)$ คือ

$$\begin{aligned}\|\bar{r}'(t)\| &= \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{t}{c}\right)} \\ &= \cosh\left(\frac{t}{c}\right)\end{aligned}\quad (3.14)$$

พิจารณาเวกเตอร์สัมผัส $\bar{T}(t)$ ที่จุด $\bar{r}(t)$ คือ

$$\begin{aligned}\bar{T}(t) &= \frac{\bar{r}'(t)}{\|\bar{r}'(t)\|} \\ &= \frac{1}{\cosh\left(\frac{t}{c}\right)}\hat{i} + \frac{\sinh\left(\frac{t}{c}\right)}{\cosh\left(\frac{t}{c}\right)}\hat{j} \\ &= \operatorname{sech}\left(\frac{t}{c}\right)\hat{i} + \tanh\left(\frac{t}{c}\right)\hat{j}\end{aligned}\quad (3.15)$$

และ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์สัมผัส $\bar{T}(t)$ ที่จุด $\bar{r}(t)$ คือ

$$\bar{T}' = -\frac{1}{c}\operatorname{sech}\left(\frac{t}{c}\right)\tanh\left(\frac{t}{c}\right)\hat{i} + \frac{1}{c}\operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)\hat{j}\quad (3.16)$$

และ ขนาดของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์สัมผัส $\bar{T}'(t)$ ที่จุด $\bar{r}(t)$ คือ

$$\begin{aligned}\|\bar{T}'\| &= \sqrt{\frac{1}{c^2}\operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)\tanh^2\left(\frac{t}{c}\right) + \frac{1}{c^2}\operatorname{sech}^4\left(\frac{t}{c}\right)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{c^2}\operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)\left[\tanh^2\left(\frac{t}{c}\right) + \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)\right]} \\ &= \frac{1}{c}\operatorname{sech}\left(\frac{t}{c}\right)\end{aligned}\quad (3.17)$$

จากสมการ (3.14) และ (3.17) จะได้ ค่าความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน
คือ

$$\kappa(t) = \frac{\|\bar{T}'(t)\|}{\|\bar{r}'(t)\|}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{1}{c} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{c}\right)}{\cosh\left(\frac{t}{c}\right)} \\
&= \frac{1}{c} \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

และ จากสมการ (3.18) จะได้ รัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน คือ

$$\begin{aligned}
\rho(t) &= \frac{1}{\kappa(t)} \\
&= \frac{1}{\frac{1}{c} \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{c}\right)} \\
&= c \cosh^2\left(\frac{t}{c}\right)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

3.1.5 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน

การพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังแสงในงานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ซึ่งจะพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังแสงอันเนื่องมาจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเพียงอย่างเดียว

สมการการสูญเสียกำลังแสงจากแมคโครเบนดคือ

$$\begin{aligned}
\gamma &= 10 \log \frac{\alpha + 2}{(2\alpha)(a_0/R\Delta)} \\
&= 10 \log \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha} \right) \left(\frac{\Delta}{a_0} \right) + 10 \log R
\end{aligned} \tag{3.20}$$

โดยที่

Δ คือ ผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและเคลด

R คือ รัศมีของการโค้งงอ

a_0 คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน

จากสมการ (3.20) จะใช้รัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขน ρ มาพิจารณาแทนรัศมีของการโค้งงอ R และจากสมการ (3.19) รัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนจะเปลี่ยนไปตามตัวแปรเสริม t แต่เนื่องจากค่าต่ำสุดของ $\cosh^2\left(\frac{t}{c}\right) = 1$ อยู่ที่ตำแหน่ง $t=0$ ดังนั้น รัศมีความโค้งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนจะอยู่ที่ตำแหน่ง $t = 0$ ด้วย งานวิจัยฉบับนี้ จึงใช้รัศมีความโค้งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนในการพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังแสง คือ

$$\rho(0) = c \quad (3.21)$$

ดังนั้น จากสมการ (3.20) และ (3.21) ได้ว่า

$$\gamma = 10 \log\left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha}\right)\left(\frac{\Delta}{a_0}\right) + 10 \log c \quad (3.22)$$

งานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจากสมการ (3.22) กำหนดให้ ค่าการสูญเสียกำลังแสงที่พิจารณาจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขน คือ

$$loss_{curve} = 10 \log c \quad (3.23)$$

3.1.6 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจะมีส่วนช่วยในการพิจารณาการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงบนเสาไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการประหยัดงบประมาณ โดยการประหยัดสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขน จากรูปที่ 3.1 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$loop\ storage = 2l - 2x \quad (3.24)$$

3.1.7 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวน

ในการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วบนเสาไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะพยายามแขวนให้เป็นเส้นตรงมากที่สุดเพื่อช่วยให้ประหยัดสายเคเบิลใยแก้วนำแสง แต่เนื่องจากน้ำหนักของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจึงทำให้เกิดการตกท้องช้างขึ้น จากรูปที่ 3.1 เห็นได้ว่า ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีความสัมพันธ์กับความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงและความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน คือ

$$h = y - c \quad (3.25)$$

3.1.8 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย พิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนกับความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ซึ่งค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยจึงสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

$$\text{loss per unit length} = \frac{\text{loss}_{\text{curve}}}{2l} \quad (3.26)$$

3.2 วิธีการจำลอง

จากหัวข้อ 3.1 ได้แสดงค่าและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนให้เห็นชัดเจนแล้ว ในหัวข้อนี้ จะเป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าและสมการที่กล่าวมาข้างต้นและใช้วิธีการจำลองในการหาผลเฉลยและนำผลเฉลยที่ได้ไปหาผลลัพธ์ของค่าต่างๆสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

จากรูปที่ 3.1 เห็นได้ว่า ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเท่ากับผลรวมระหว่างระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงกับความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน แสดงได้โดยสมการต่อไปนี้

$$y = h + c \quad (3.27)$$

และจากสมการ (3.1) และ (3.27) ได้ว่า

$$h + c = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3.28)$$

หรือ

$$\frac{h}{c} + 1 = \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (3.29)$$

โดยที่

x คือ ค่าคงที่

และจากสมการ (3.10) จะเห็นได้ว่า

$$T \propto y \quad (3.30)$$

เพราะฉะนั้น ถ้า y น้อยสุด แล้ว T น้อยสุด

โดยการใช้วิธีการจำลองเพื่อหาผลเฉลยคือค่าความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสง และระยะตกท้องช้างขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสง จากสมการ (3.29) บนเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาคือแรงตึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง นั่นคือความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสงตึงน้อยสุดด้วย จากผลเฉลยที่ได้ก็จะนำไปใช้หาค่าต่างๆคือ ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยาน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยาน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยานเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย และความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสง สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ต่อไป

3.3 วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ในหัวข้อนี้ จะนำทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 มาใช้หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสมการความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง บนเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาคือแรงตึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง และนำผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้หาผลลัพธ์ของค่าต่างๆสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

พิจารณาสมการความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.1) บนเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาคือแรงตึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

จากสมการ (3.29) ซึ่งเป็นสมการของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวน คือ

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right)$$

โดยที่

x คือ ค่าคงที่

$c > 0$

โดยใช้ทฤษฎีบทของเทเลอร์กระจาย $\cosh\left(\frac{x}{c}\right)$ จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \cosh\left(\frac{x}{c}\right) &= 1 + \frac{1}{2!}\left(\frac{x}{c}\right)^2 + \frac{1}{4!}\left(\frac{x}{c}\right)^4 + \frac{1}{6!}\left(\frac{x}{c}\right)^6 + \dots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \left(\frac{x}{c}\right)^{2n} \end{aligned} \quad (3.31)$$

ดังนั้น สมการความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง กลายเป็น

$$\begin{aligned} y &= c \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \left(\frac{x}{c}\right)^{2n} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \frac{x^{2n}}{c^{2n-1}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

พิจารณาค่าอนุพันธ์ของสมการ (3.32) โดยหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ (3.32) เทียบกับตัวแปร x ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} y' &= - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n)!} \left(\frac{x}{c}\right)^{2n} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

เนื่องจาก x คือค่าคงที่ และ $c > 0$

ดังนั้น กำหนดให้ จุลวิฤติสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ของสมการ (3.33) สามารถเขียนได้เป็น

$$c = \frac{1}{a} x \quad (3.34)$$

โดยที่

a คือ จำนวนจริงใดๆ และ $a \neq 0$

แทน $c = \frac{1}{a} x$ ในสมการ (3.33) ได้เป็น

$$-\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n)!} a^{2n} = 0 \quad (3.35)$$

โดยการทดสอบอัตราส่วนของอนุกรม (3.35) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{(2(n+1)-1)}{(2(n+1))!} a^{2(n+1)}}{\frac{(2n-1)}{(2n)!} a^{2n}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n+1)(2n)!}{(2n+2)!(2n-1)} \frac{a^{2n+2}}{a^{2n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(2n+2)(2n-1)} a^2 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.36)$$

ดังนั้น จากการทดสอบอัตราส่วนของอนุกรม (3.35) สรุปได้ว่าอนุกรม (3.35) เป็นอนุกรมลู่เข้าสำหรับทุก a และจากการลู่เข้าของอนุกรม (3.35) จึงสามารถสรุปอีกได้ว่ามีค่า a เพียงค่าเดียวที่ทำให้สมการ (3.35) เป็นจริง สำหรับ $c > 0$ และ x คือค่าคงที่

อนุพันธ์อันดับสองของสมการ (3.32) เทียบกับตัวแปร c คือ

$$y'' = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n(2n-1)}{(2n)!} \frac{x^{2n}}{c^{2n+1}} \quad (3.37)$$

เห็นได้ชัดว่า $y'' \geq 0$ สำหรับทุก $c > 0$

จึงสรุปได้ว่า $c = \frac{1}{a}x$ คือจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ สำหรับแต่ละ x นั่นคือ $c = \frac{1}{a}x$ เป็นความสูงต่ำสุดจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง จากข้อสรุปนี้ จึงสามารถหาค่าต่างๆได้ ดังต่อไปนี้

จากสมการความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.1) เมื่อแทน $c = \frac{1}{a}x$ ในสมการ (3.1) จะได้ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{a}x \cosh\left(\frac{x}{\frac{1}{a}x}\right) \\ &= \frac{\cosh(a)}{a}x \end{aligned} \quad (3.38)$$

จากสมการครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.4) เมื่อแทน $c = \frac{1}{a}x$ ในสมการ (3.4) จะได้ครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} l &= \frac{1}{a}x \sinh\left(\frac{x}{\frac{1}{a}x}\right) \\ &= \frac{\sinh(a)}{a}x \end{aligned} \quad (3.39)$$

จากสมการค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน (3.23) เมื่อแทน $c = \frac{1}{a}x$ ในสมการ (3.23) จะได้ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} loss_{curve} &= 10 \log\left(\frac{1}{a}x\right) \\ &= 10 \log x - 10 \log a \end{aligned} \quad (3.40)$$

จากสมการความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.24) เมื่อแทน l จากสมการ (3.39) ในสมการ (3.24) จะได้ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง η ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \text{loop storage} &= 2 \frac{\sinh(a)}{a} x - 2x \\ &= 2 \left(\frac{\sinh(a)}{a} - 1 \right) x \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากสมการระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.25) เมื่อแทน y จากสมการ (3.38) และ $c = \frac{1}{a} x$ ในสมการ (3.25) จะได้ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง η ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} h &= \frac{\cosh(a)}{a} x - \frac{1}{a} x \\ &= \frac{\cosh(a) - 1}{a} x \end{aligned} \quad (3.42)$$

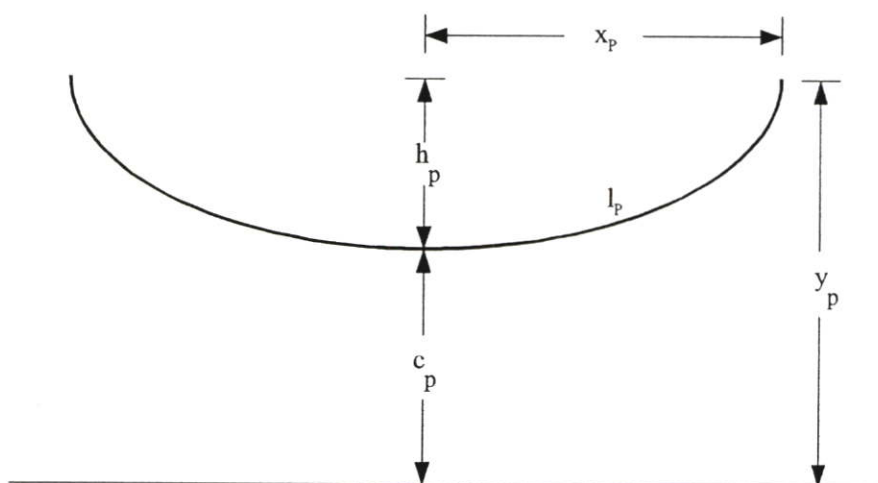
จากสมการค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (3.26) เมื่อแทน l จากสมการ (3.39) และ $loss_{curve}$ จากสมการ (3.40) ในสมการ (3.26) จะได้ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย η ความสูงต่ำสุดขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \text{loss per unit length} &= \frac{10 \log x - 10 \log a}{2 \left(\frac{\sinh(a)}{a} x \right)} \\ &= \frac{5a(\log x - \log a)}{x \sinh(a)} \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.4 การรบกวนเล็กน้อย

จากหัวข้อ 3.3 ได้แสดงสมการค่าต่างๆที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มาแล้ว ในหัวข้อนี้ จะศึกษาการรบกวนเล็กน้อยกับสมการค่าต่างๆที่แสดงไว้และจะพิจารณาผลที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยนี้ ซึ่งการรบกวนเล็กน้อยนี้มีผลทำให้เกิดการรบกวนเล็กน้อยกับความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน และแรงตึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง

งานวิจัยฉบับนี้ จะศึกษาการรบกวนเล็กน้อยของค่าและสมการที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์



รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนเล็กน้อย

จากรูปที่ 3.3 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$y_p = c_p \cosh\left(\frac{x_p}{c_p}\right) \quad (3.44)$$

โดยที่

x_p คือ ค่าคงที่

$c_p > 0$

และครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$l_P = c_P \sinh\left(\frac{x_P}{c_P}\right) \quad (3.45)$$

จากสมการ (3.44) และ (3.45) พิจารณาความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย ดังนี้

$$\begin{aligned} y_P^2 - l_P^2 &= c_P^2 \cosh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) - c_P^2 \sinh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) \\ &= c_P^2 \left(\cosh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) - \sinh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) \right) \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\cosh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) - \sinh^2\left(\frac{x_P}{c_P}\right) = 1$ ดังนั้น ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$c_P = \sqrt{y_P^2 - l_P^2} \quad (3.46)$$

โดยที่

$$y_P^2 - l_P^2 \geq 0$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve_P} = 10 \log c_P \quad (3.47)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงและระยะห่างของเสาไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$\text{loop storage}_P = 2l_P - 2x_P \quad (3.48)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงและความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_P = y_P - c_P \quad (3.49)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงและค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$\text{loss per unit length}_P = \frac{\text{loss}_{\text{curve}_P}}{2l_P} \quad (3.50)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง กำหนดให้ T_P คือแรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวนเล็กน้อย แล้วแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

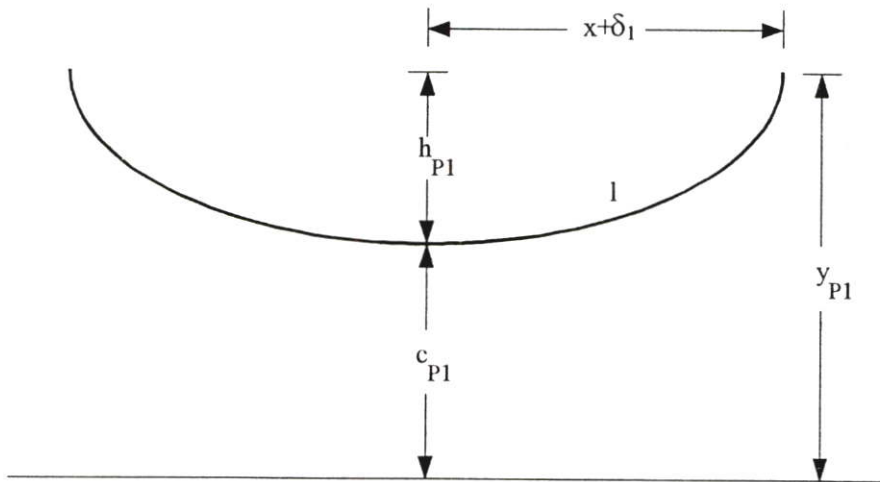
$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_P}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_P}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y_P}{y} \right| \times 100 \end{aligned} \quad (3.51)$$

โดยที่

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right)$$

3.4.1 การรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อสายเคเบิลใยแก้วนำแสงมีจำกัดและต้องการติดตั้งบนเสาไฟฟ้าแรงสูง โดยที่ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นระยะ $2\delta_1$ และจะมีผลกระทบต่อความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง และแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

เนื่องจาก ไม่มีผลกระทบต่อความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเมื่อครั้งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น δ_1 ได้ว่า

$$l = c \sinh\left(\frac{x}{c}\right) = c_{P1} \sinh\left(\frac{x + \delta_1}{c_{P1}}\right) \quad (3.52)$$

โดยใช้ทฤษฎีบทของเทเลอร์กระจาย $\sinh\left(\frac{x}{c}\right)$ และ $\sinh\left(\frac{x + \delta_1}{c_{P1}}\right)$ จะได้เป็น

$$\sinh\left(\frac{x}{c}\right) = \left(\frac{x}{c}\right) + \frac{1}{3!}\left(\frac{x}{c}\right)^3 + \frac{1}{5!}\left(\frac{x}{c}\right)^5 + \frac{1}{7!}\left(\frac{x}{c}\right)^7 + \dots$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \left(\frac{x}{c}\right)^{2n-1} \quad (3.53)$$

และ

$$\begin{aligned} \sinh\left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right) &= \left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right) + \frac{1}{3!} \left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right)^5 + \frac{1}{7!} \left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right)^7 + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \left(\frac{x+\delta_1}{c_{P1}}\right)^{2n-1} \end{aligned} \quad (3.54)$$

แทนอนุกรม (3.53) และ (3.54) ในสมการ (3.52) ได้เป็น

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c^{2n-2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{(x+\delta_1)^{2n-1}}{c_{P1}^{2n-2}} \quad (3.55)$$

กระจายอนุกรมด้านขวามือของสมการ (3.55) และจัดรูปให้อยู่ในพจน์ของ δ_1 โดยใช้การกระจายของทวินาม ได้เป็น

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{(x+\delta_1)^{2n-1}}{c_{P1}^{2n-2}} &= \frac{1}{1!} (x+\delta_1) + \frac{1}{3!} \frac{(x+\delta_1)^3}{c_{P1}^2} + \frac{1}{5!} \frac{(x+\delta_1)^5}{c_{P1}^4} + \dots \\ &= \frac{1}{1!} (x+\delta_1) + \frac{1}{3!} \frac{x^3 + 3\delta_1 x^2 + 3\delta_1^2 x + \delta_1^3}{c_{P1}^2} \\ &\quad + \frac{1}{5!} \frac{x^5 + 5\delta_1 x^4 + 10\delta_1^2 x^3 + 10\delta_1^3 x^2 + 5\delta_1^4 x + \delta_1^5}{c_{P1}^4} + \dots \\ &= \left(\frac{1}{1!} x + \frac{1}{3!} \frac{x^3}{c_{P1}^2} + \frac{1}{5!} \frac{x^5}{c_{P1}^4} + \dots \right) + \left(\frac{1}{1!} + \frac{1}{3!} \frac{3x^2}{c_{P1}^2} + \frac{1}{5!} \frac{5x^4}{c_{P1}^4} + \dots \right) \delta_1 \\ &\quad + \left(\frac{1}{3!} \frac{3x}{c_{P1}^2} + \frac{1}{5!} \frac{10x^3}{c_{P1}^4} + \frac{1}{7!} \frac{21x^5}{c_{P1}^6} + \dots \right) \delta_1^2 + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c_{P1}^{2n-2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-2}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1 \\ &\quad + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(2n-1)(2n-2)}{2!(2n-1)!} \frac{x^{2n-3}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1^2 + \dots \end{aligned} \quad (3.56)$$

จากสมการ (3.55) และ (3.56) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c^{2n-2}} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c_{P1}^{2n-2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-2}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1 \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(2n-1)(2n-2)}{2!(2n-1)!} \frac{x^{2n-3}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1^2 + \dots \end{aligned} \quad (3.57)$$

เนื่องจาก มีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับระยะห่างของเสาไฟฟ้า ดังนั้น จะมีผลทำให้ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อยด้วย กำหนดให้ผลที่เกิดจากการรบกวนเล็กน้อยเป็นระยะ β_1 จากความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ สามารถเขียนได้เป็น

$$c_{P1} = c + \beta_1 \quad (3.58)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าและความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$y_{P1} = c_{P1} \cosh\left(\frac{x + \delta_1}{c_{P1}}\right) \quad (3.59)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัสมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve_{P1}} = 10 \log c_{P1} \quad (3.60)$$

เนื่องจาก ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจากการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้า มีผลที่ทำให้ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$\text{loop storage } p_1 = 2l - 2(x + \delta_1) \quad (3.61)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงและความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ระยะคกท้องข้างขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_{p1} = y_{p1} - c_{p1} \quad (3.62)$$

เนื่องจาก ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจากการรบกวนเล็กน้อยของค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรศมี ความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$\text{loss per unit length } p_1 = \frac{\text{loss}_{\text{curve } p_1}}{2l} \quad (3.63)$$

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีการเปลี่ยนแปลงจากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ถ้า กำหนดให้ T_p คือแรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวนแล้วแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_{P1}}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_{P1}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y_{P1}}{y} \right| \times 100 \end{aligned} \quad (3.64)$$

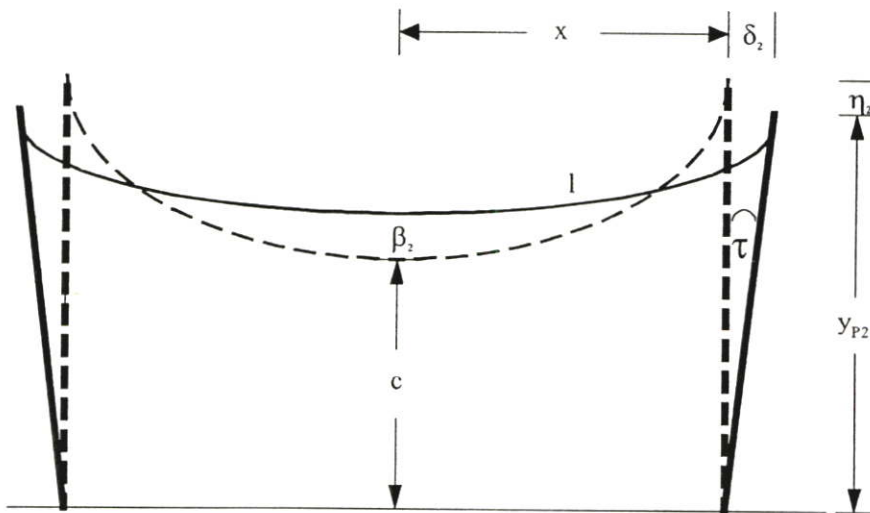
โดยที่

$$y = c \cosh\left(\frac{x + \delta_1}{c}\right)$$

3.4.2 การรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง

ในหัวข้อนี้ ได้เสนอการเปลี่ยนแปลงจากการรบกวนเล็กน้อยเป็นสองกรณี โดยที่ขนาดขององศาของทั้งสองกรณีเท่ากันแต่มีทิศทางของการเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกัน งานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาเฉพาะขนาดของที่เปลี่ยนแปลงจากการรบกวนเล็กน้อย ซึ่งทิศทางของการเปลี่ยนแปลงจะเป็นไปตามความเป็นจริงที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ

เมื่อติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงบนเสาไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ค่าต่างๆที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงตามที่ต้องการแล้ว แต่เสาไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งเกิดการรบกวนเล็กน้อยซึ่งทำให้เอียงเป็นมุม τ กับแนวของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ควรจะเป็นคือ 90° จะมีผลกระทบถึงความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน และระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง โดยจะไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการรบกวนเล็กน้อยของความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน



รูปที่ 3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของเสาไฟฟ้าแรงสูงแบบที่ 1

จากรูปที่ 3.4 เห็นได้ว่า มีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำให้เอียงเป็นมุม τ กับแนวของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ควรจะเป็นคือ 90° ดังนั้น จะมีผลทำให้ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ y เกิดการรบกวนเล็กน้อยซึ่งมีผลทำให้เป็น

$$y_{P2} = y \sin(90^\circ - \tau) \quad (3.65)$$

โดยที่

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right)$$

และผลต่างระหว่างความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง คือ

$$\begin{aligned} \eta_2 &= y - y_{P2} \\ &= y - y \sin(90^\circ - \tau) \end{aligned} \quad (3.66)$$

และทำให้ขนาดระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$|\delta_2| = |y \cos(90^\circ - \tau)| \quad (3.67)$$

เนื่องจาก มีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ดังนั้น จะมีผลทำให้ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อยด้วย สมมติให้ผลที่เกิดจากการรบกวนเล็กน้อยเป็นระยะ β_2 จากความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ สามารถเขียนได้เป็น

$$c_{P2} = c + |\beta_2| \quad (3.68)$$

พิจารณา β_2 จากสมการ (3.46), (3.65) และ (3.68) เมื่อความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนไม่มีการรบกวน ได้เป็น

$$\begin{aligned} c + |\beta_2| &= \sqrt{y_{P_2}^2 - l^2} \\ &= \sqrt{(y \sin(90^\circ - \tau))^2 - l^2} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\beta_2 = \left| \sqrt{(y \sin(90^\circ - \tau))^2 - l^2} - c \right| \quad (3.69)$$

โดยที่

$$l = c \sinh\left(\frac{x}{c}\right)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง เกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve_{P_2}} = 10 \log c_{P_2} \quad (3.70)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงและความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ระยะตกห้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_{P_2} = y_{P_2} - c_{P_2} \quad (3.71)$$

เนื่องจาก ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจากการรบกวนเล็กน้อยของค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมี

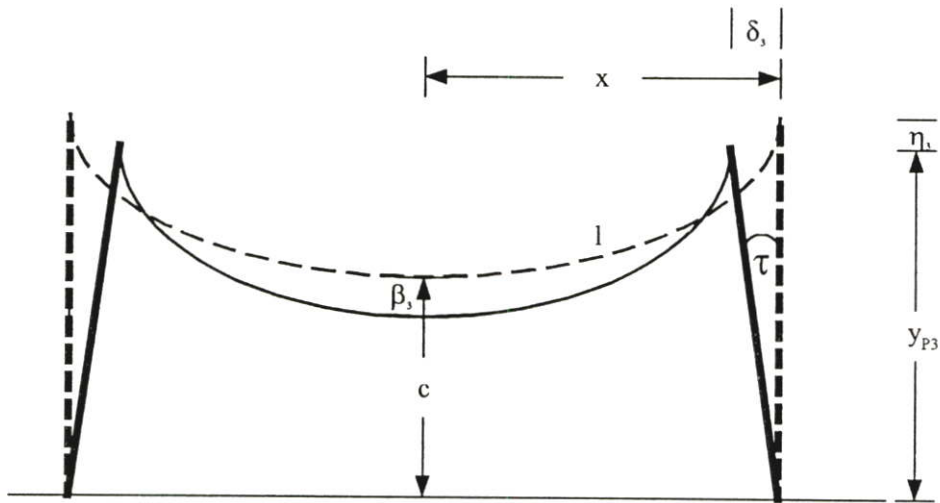
ความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง เกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$\text{loss per unit length}_{P2} = \frac{\text{loss}_{\text{curve}_{P2}}}{2l} \quad (3.72)$$

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีการเปลี่ยนแปลงจากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ถ้า กำหนดให้ T_{P2} คือแรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เกิดการรบกวน แล้วแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_{P2}}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_{P2}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y_{P2}}{y} \right| \times 100 \end{aligned} \quad (3.73)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าเกิดการรบกวนเล็กน้อยดังรูปที่ 3.5 คือมีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำให้เอียงเป็นมุม τ กับแนวของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ควรจะเป็นคือ 90° แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน แล้วผลจากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ผลต่างระหว่างความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงกับผลจากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขนาดของระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนของเสาไฟฟ้าแรงสูงแบบที่ 2

เนื่องจาก มีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ดังนั้น จะมีผลทำให้ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อยด้วย สมมติให้ผลที่เกิดจากการรบกวนเล็กน้อยเป็นระยะ β_3 จากความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ สามารถเขียนได้เป็น

$$c_{P3} = c - |\beta_3| \quad (3.74)$$

พิจารณา β_3 จากสมการ (3.46), (3.65) และ (3.74) เมื่อความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนไม่มีการรบกวน ได้เป็น

$$\begin{aligned} c - |\beta_3| &= \sqrt{y_{P3}^2 - l^2} \\ &= \sqrt{(y \sin(90^\circ + \tau))^2 - l^2} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\beta_3 = \left| c - \sqrt{(y \sin(90^\circ + \tau))^2 - l^2} \right| \quad (3.75)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง เกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve p_3} = 10 \log c_{p_3} \quad (3.76)$$

จากการรบกวนเล็กน้อยของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงและความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_{p_3} = y_{p_3} - c_{p_3} \quad (3.77)$$

เนื่องจาก ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจากการรบกวนเล็กน้อยของค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง มีผลที่ทำให้ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง เกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss \text{ per unit length }_{p_3} = \frac{loss_{curve p_3}}{2l} \quad (3.78)$$

บทที่ 4

ผลของงานวิจัย

ในบทนี้ จะนำสมการค่าต่างๆที่ได้จากวิธีการจำลอง วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และการรบกวนในบทที่ 3 มาหาผลเฉลยและนำผลเฉลยที่ได้จากคำนวณ โดยวิธีการดังกล่าวมาหาผลลัพธ์ของค่าต่างๆคือ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลไฮแก้วนำแสง และระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลไฮแก้วนำแสง สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบจากวิธีดังกล่าวสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

4.1 ผลของงานวิจัย

ในหัวข้อนี้ จะแสดงผลเฉลยและผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณ โดยวิธีการจำลอง วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และผลของการรบกวนเล็กน้อย ซึ่งหน่วยของผลเฉลยและผลลัพธ์ของค่าต่างๆนี้อาจจะพิจารณาในระบบหน่วยสากล (International System of Units : SI) คือ เมตร เพื่อความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบและติดตั้งสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงบนเสาไฟฟ้าแรงสูง และพิจารณาผลเฉลยและผลลัพธ์โดยประมาณเป็นทศนิยมสี่ตำแหน่งเพื่อให้เห็นความแตกต่างของค่าชัดเจนยิ่งขึ้น

4.1.1 ผลของวิธีการจำลอง

จากหัวข้อ 3.2 สมการ (3.29) ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงกับความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลไฮแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\frac{h}{c} + 1 = \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (4.1)$$

โดยที่

x คือ ค่าคงที่

และจากสมการ (3.30) ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของสายเคเบิลโยก้านำแสง และความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวน คือ

$$T \propto y \quad (4.2)$$

นั่นคือ ถ้าแรงดึงของสายเคเบิลโยก้านำแสงน้อยสุด แล้วความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวนต่ำสุด

เนื่องจาก สมการ (4.1) เป็นสมการอดิศัย ดังนั้น ผลเฉลยของสมการ (4.1) คือ ระยะเวลาที่แขวนสายเคเบิลโยก้านำแสงและความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นค่าประมาณ งานวิจัยฉบับนี้ จะหาผลเฉลยโดยประมาณเป็นทศนิยมสองตำแหน่ง

โดยใช้วิธีการจำลองในการคำนวณหาผลเฉลยของสมการ (4.1) บนเงื่อนไขของสมการ (4.2) นั่นคือ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวนที่ได้จะต้องทำให้ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลโยก้านำแสงต้องน้อยสุดสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงด้วย และผลเฉลยที่ได้จะนำไปคำนวณหาผลลัพธ์ค่าต่างๆคือ ความยาวของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลโยก้านำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

ผลเฉลยและผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากวิธีการจำลองสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลของวิธีการจำลอง

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ระยะตกที่องข้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของทแยงนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้แขวน (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่เกิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียความยาว (dB/หน่วย)
10	3.37	4.17	7.5444	12.5744	2.5744	6.2014	0.4932
12	4.05	5.00	9.0533	15.0946	3.0946	6.9897	0.4631
14	4.73	5.83	10.5622	17.6148	3.6148	7.6567	0.4347
16	5.40	6.67	12.071	20.1217	4.1217	8.2413	0.4096
18	6.08	7.50	13.5799	22.6419	4.6419	8.7506	0.3865
20	6.75	8.34	15.0888	25.1489	5.1489	9.2117	0.3663
22	7.43	9.17	16.5977	27.6690	5.6690	9.6237	0.3478
24	8.11	10.00	18.1066	30.1892	6.1892	10.0000	0.3312
26	8.78	10.84	19.6154	32.6962	6.6962	10.3503	0.3166
28	9.45	11.67	21.1243	35.2163	7.2163	10.6707	0.3030
30	10.13	12.50	22.6332	37.7365	7.7365	10.9691	0.2907
32	10.80	13.34	24.1421	40.2435	8.2435	11.2516	0.2796
34	11.48	14.17	25.6510	42.7637	8.7637	11.5137	0.2692
36	12.16	15.00	27.1598	45.2838	9.2838	11.7609	0.2597

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ระยะตกท้องช้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของกระแสวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้แวน (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่เกิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)
38	12.83	15.84	28.6687	47.7908	9.7908	11.9976	0.2510
40	13.51	16.67	30.1776	50.3110	10.3110	12.2194	0.2429
42	14.19	17.50	31.6865	52.8311	10.8311	12.4304	0.2353
44	14.86	18.34	33.1954	55.3381	11.3381	12.6340	0.2283
46	15.53	19.17	34.7042	57.8583	11.8583	12.8262	0.2217
48	16.20	20.01	36.2131	60.3652	12.3652	13.0125	0.2156
50	16.88	20.84	37.7220	62.8854	12.8854	13.1890	0.2097
52	17.56	21.67	39.2309	65.4056	13.4056	13.3586	0.2042
54	18.23	22.51	40.7397	67.9125	13.9125	13.5238	0.1991
56	18.91	23.34	42.2486	70.4327	14.4327	13.6810	0.1942
58	19.59	24.17	43.7575	72.9529	14.9529	13.8328	0.1896
60	20.26	25.01	45.2664	75.4598	15.4598	13.9811	0.1853

4.1.2 ผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

จากหัวข้อ 3.3 จะเห็นได้ว่าสมการค่าต่างๆ บนเงื่อนไขแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง คือ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง และระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง จะอยู่ในรูปของตัวแปร a ซึ่งเป็นจำนวนจริงใดๆ ดังนั้น ผลเฉลยที่ต้องการหาคือ a

งานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาเฉพาะขนาดของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนและขนาดของครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง นั่นคือ $c > 0$ และ $x \geq 0$ ดังนั้น จากสมการ (3.34) คือ

$$c = \frac{1}{a} x \quad (4.3)$$

โดยที่

$$a > 0$$

หาผลเฉลย a จากสมการ (3.35) คือ

$$-\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n)!} a^{2n} = 0 \quad (4.4)$$

คำนวณหาผลเฉลย a โดยประมาณเป็นทศนิยมสี่ตำแหน่งเมื่อกระจายอนุกรมของสมการ (4.4) ออกเป็น 11 พจน์ คือ

$$-\sum_{n=0}^{10} \frac{(2n-1)}{(2n)!} a^{2n} \approx 0 \quad (4.5)$$

ผลเฉลย a ที่ได้จากสมการ (4.5) คือ $a \approx 1.1997$ จากผลเฉลยที่ได้นำไปหาผลลัพธ์ของค่าต่างๆ ดังนี้

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$c = \frac{1}{1.1997} x \quad (4.6)$$

ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$y = \frac{\cosh(1.1997)}{1.1997} x \quad (4.7)$$

ครึ่งความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$l = \frac{\sinh(1.1997)}{1.1997} x \quad (4.8)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$loss_{curve} = 10 \log x - 10 \log 1.1997 \quad (4.9)$$

ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$loop\ storage = 2 \left(\frac{\sinh(1.1997)}{1.1997} - 1 \right) x \quad (4.10)$$

ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$h = \frac{\cosh(1.1997) - 1}{1.1997} x \quad (4.11)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง
คือ

$$\text{loss per unit length} = \frac{5(1.1997)(\log x - \log 1.1997)}{x \sinh(1.1997)} \quad (4.12)$$

ผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ผลของวิธีการหาผลผลิตเชิงวิเคราะห์

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ระยะตกที่ช่องข้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการแขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้แขวน (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่กิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)
10	3.3767	4.1677	7.5444	12.5775	2.5775	6.1990	0.4929
12	4.0520	5.0013	9.0533	15.0930	3.0930	6.9908	0.4632
14	4.7274	5.8348	10.5622	17.6084	3.6084	7.6603	0.4350
16	5.4027	6.6683	12.0710	20.1239	4.1239	8.2402	0.4095
18	6.078	7.5019	13.5799	22.6394	4.6394	8.7517	0.3866
20	6.7534	8.3354	15.0888	25.1549	5.1549	9.2093	0.3661
22	7.4287	9.1690	16.5977	27.6704	5.6704	9.6232	0.3478
24	8.1041	10.0025	18.1066	30.1859	6.1859	10.0011	0.3313
26	8.7794	10.8360	19.6154	32.7014	6.7014	10.3487	0.3165
28	9.4547	11.6696	21.1243	35.2169	7.2169	10.6706	0.3030
30	10.1301	12.5031	22.6332	37.7324	7.7324	10.9702	0.2907
32	10.8054	13.3367	24.1421	40.2479	8.2479	11.2505	0.2795
34	11.4807	14.1702	25.6510	42.7634	8.7634	11.5138	0.2692
36	12.1561	15.0038	27.1598	45.2789	9.2789	11.7620	0.2598

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ระยะตกท้องช้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของแกนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้แขวน (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่กิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)
38	12.8314	15.8373	28.6687	47.7944	9.7944	11.9968	0.2510
40	13.5068	16.6708	30.1776	50.3099	10.3099	12.2196	0.2429
42	14.1821	17.5044	31.6865	52.8253	10.8253	12.4315	0.2353
44	14.8574	18.3379	33.1954	55.3408	11.3408	12.6335	0.2283
46	15.5328	19.1715	34.7042	57.8563	11.8563	12.8266	0.2217
48	16.2081	20.0050	36.2131	60.3718	12.3718	13.0114	0.2155
50	16.8834	20.8385	37.7220	62.8873	12.8873	13.1887	0.2097
52	17.5588	21.6721	39.2309	65.4028	13.4028	13.359	0.2043
54	18.2341	22.5056	40.7397	67.9183	13.9183	13.5229	0.1991
56	18.9095	23.3392	42.2486	70.4338	14.4338	13.6809	0.1942
58	19.5848	24.1727	43.7575	72.9493	14.9493	13.8333	0.1896
60	20.2601	25.0063	45.2664	75.4648	15.4648	13.9805	0.1853

4.1.3 ผลของการรบกวนเล็กน้อย

ในหัวข้อนี้ จะนำค่าและสมการต่างๆจากหัวข้อ 3.4 มาคำนวณหาผลเฉลยและผลลัพธ์ตาม การรบกวนเล็กน้อย ดังนี้

4.1.3.1 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

จากหัวข้อ 3.4.1 ครึ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีการรบกวนเล็กน้อยเป็นระยะ δ_1 มีผล ทำให้ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเป็นระยะ β_1 เมื่อความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงคงที่ พิจารณาสมการ (3.57) ถึงพจน์ของ δ_1^2 คือ

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c^{2n-2}} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{c_{P1}^{2n-2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-2}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1 \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(2n-1)(2n-2)}{2!(2n-1)!} \frac{x^{2n-3}}{c_{P1}^{2n-2}} \delta_1^2 + O(\delta_1^3) \end{aligned} \quad (4.13)$$

และจากสมการ (3.58) ผลของการรบกวนของความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$c_{P1} = \frac{1}{a}x + \beta_1 \quad (4.14)$$

งานวิจัยฉบับนี้ ผลของการรบกวนเล็กน้อยซึ่งใช้ในการพิจารณาคือ $\delta_1 = 0.1, 0.3, 0.5$ และกระจายแต่ละอนุกรมของสมการ (4.13) ออกเป็น 5 พจน์ ซึ่งเป็นการพิจารณาจากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และจากสมการ (4.13) และ (4.14) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^5 \frac{a^{2n}}{(2n-1)!} \frac{1}{x} &\approx \sum_{n=1}^5 \frac{a^{2n}}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-1}}{(x+a\beta_1)^{2n}} + \sum_{n=1}^5 \frac{(2n-1)a^{2n}}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-2}}{(x+a\beta_1)^{2n}} \delta_1 \\ &+ \sum_{n=2}^5 \frac{(2n-1)(n-1)a^{2n}}{(2n-1)!} \frac{x^{2n-3}}{(x+a\beta_1)^{2n}} \delta_1^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$a \approx 1.1997$$

x เป็นค่าคงที่

$$\delta_1 = 0.1, 0.3, 0.5$$

คำนวณหาผลเฉลย β_1 จากสมการ (4.15) โดยประมาณเป็นทศนิยมสี่ตำแหน่งสำหรับแต่ละ δ_1 และนำผลเฉลย β_1 ที่ได้ไปคำนวณผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่เป็นผลจากการรบกวนเล็กน้อย ดังนี้ ความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$y_{P1} = c_{P1} \cosh\left(\frac{x + \delta_1}{c_{P1}}\right) \quad (4.16)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$loss_{curve_{P1}} = 10 \log c_{P1} \quad (4.17)$$

ความยาวของสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงขณะที่ยานเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$loop\ storage_{P1} = 2l - 2(x + \delta_1) \quad (4.18)$$

โดยที่

$$l = \frac{\sinh(1.1997)}{1.1997} x$$

ระยะตกท้องข้างขณะที่ยานสายเคเบิลโยกแกว่งนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$h_{P1} = y_{P1} - c_{P1} \quad (4.19)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\text{loss per unit length}_{P1} = \frac{\text{loss}_{\text{curve}_{P1}}}{2l} \quad (4.20)$$

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลโดยแก้วนำแสงที่จุดแขวนที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละ สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_{P1}}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_{P1}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y_{P1}}{y} \right| \times 100 \end{aligned} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$y = \frac{\cosh(1.1997)}{1.1997} (x + \delta_1)$$

ผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากการรบกวน $\delta_1 = 0.1, 0.3, 0.5$ สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.1$

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ระยะตกท้องช้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสาย เคเบิลที่เกิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
10	0.2882	3.2515	4.4559	7.7074	2.3775	6.4894	0.5160	0.1569
12	0.2855	3.9273	5.2868	9.2141	2.8930	7.2319	0.4792	0.1079
14	0.2837	4.6030	6.1185	10.7215	3.4085	7.8664	0.4467	0.0788
16	0.2823	5.2786	6.9506	12.2293	3.9240	8.4202	0.4184	0.0600
18	0.2813	5.9541	7.7832	13.7373	4.4394	8.9116	0.3936	0.0473
20	0.2804	6.6297	8.6158	15.2455	4.9550	9.3530	0.3718	0.0382
22	0.2797	7.3052	9.4487	16.7538	5.4705	9.7537	0.3525	0.0315
24	0.2792	7.9806	10.2817	18.2623	5.9859	10.1206	0.3353	0.0264
26	0.2787	8.6560	11.1147	19.7708	6.5014	10.4590	0.3198	0.0224
28	0.2783	9.3314	11.9479	21.2793	7.0169	10.7729	0.3059	0.0193
30	0.2779	10.0069	12.7810	22.7879	7.5324	11.0657	0.2933	0.0168
32	0.2776	10.6823	13.6143	24.2965	8.0479	11.3399	0.2818	0.0148
34	0.2774	11.3576	14.4476	25.8052	8.5633	11.5980	0.2712	0.0131
36	0.2771	12.0330	15.2809	27.3139	9.0789	11.8415	0.2615	0.0116

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ระยะตกท้องข้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของจำนวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสายเคเบิลที่กิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยกิโล)
38	0.2769	12.7084	16.1142	28.8226	9.5944	12.0721	0.2526	0.0104
40	0.2767	13.3838	16.9475	30.3313	10.1099	12.2911	0.2443	0.0094
42	0.2765	14.0592	17.7809	31.8401	10.6254	12.4995	0.2366	0.0085
44	0.2764	14.7345	18.6143	33.3488	11.1408	12.6985	0.2295	0.0078
46	0.2762	15.4099	19.4477	34.8576	11.6564	12.8887	0.2228	0.0071
48	0.2761	16.0853	20.2811	36.3664	12.1718	13.0709	0.2165	0.0065
50	0.2760	16.7606	21.1145	37.8752	12.6873	13.2458	0.2106	0.0060
52	0.2759	17.4360	21.9480	39.3839	13.2028	13.4139	0.2051	0.0055
54	0.2758	18.1113	22.7814	40.8927	13.7183	13.5758	0.1999	0.0051
56	0.2757	18.7867	23.6149	42.4015	14.2338	13.7319	0.1950	0.0048
58	0.2756	19.4620	24.4483	43.9104	14.7493	13.8825	0.1903	0.0045
60	0.2755	20.1374	25.2818	45.4192	15.2648	14.0281	0.1859	0.0042

ตารางที่ 4.4 ผลของการบรรเทาความถี่ของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.3$

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการบรร เทาความถี่ (หน่วย)	ระยะตัดท่อน้อย ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสาย เคเบิลที่เกิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยละ)
10	0.9758	2.9810	5.1435	8.1245	1.9779	7.1126	0.5655	1.5931
12	0.9448	3.6617	5.9461	9.6077	2.4934	7.7423	0.5130	1.0705
14	0.9241	4.3407	6.7589	11.0995	3.0088	8.2988	0.4713	0.7692
16	0.9093	5.0186	7.5776	12.5963	3.5242	8.7953	0.4371	0.5796
18	0.8982	5.6960	8.4001	14.0961	4.0396	9.2428	0.4083	0.4524
20	0.8895	6.3730	9.2249	15.5979	4.5551	9.6496	0.3836	0.3630
22	0.8825	7.0496	10.0515	17.1011	5.0706	10.0223	0.3622	0.2976
24	0.8768	7.7260	10.8793	18.6053	5.5861	10.3660	0.3434	0.2485
26	0.8721	8.4022	11.7081	20.1104	6.1015	10.6849	0.3267	0.2107
28	0.8680	9.0784	12.5376	21.616	6.6170	10.9821	0.3118	0.1808
30	0.8646	9.7544	13.3677	23.1221	7.1324	11.2606	0.2984	0.1569
32	0.8616	10.4303	14.1983	24.6285	7.6479	11.5224	0.2863	0.1374
34	0.8590	11.1061	15.0292	26.1353	8.1634	11.7694	0.2752	0.1214
36	0.8566	11.7820	15.8604	27.6423	8.6790	12.0031	0.2651	0.1080

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ระยะตกที่ท้องช้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสาย เคเบิลที่กิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
38	0.8546	12.4576	16.6919	29.1495	9.1944	12.2251	0.2558	0.0967
40	0.8527	13.1334	17.5235	30.6569	9.7099	12.4362	0.2472	0.0871
42	0.8511	13.8090	18.3555	32.1645	10.2254	12.6377	0.2392	0.0788
44	0.8496	14.4846	19.1875	33.6721	10.7408	12.8302	0.2318	0.0717
46	0.8482	15.1603	20.0197	35.1799	11.2564	13.0146	0.2249	0.0655
48	0.8470	15.8358	20.8520	36.6878	11.7718	13.1915	0.2185	0.0601
50	0.8458	16.5114	21.6843	38.1958	12.2874	13.3615	0.2125	0.0553
52	0.8448	17.1869	22.5169	39.7038	12.8028	13.5251	0.2068	0.0510
54	0.8438	17.8625	23.3494	41.2119	13.3183	13.6828	0.2015	0.0473
56	0.8429	18.5380	24.1821	42.7200	13.8338	13.8349	0.1964	0.0439
58	0.8420	19.2135	25.0147	44.2282	14.3494	13.9820	0.1917	0.0409
60	0.8413	19.8890	25.8476	45.7365	14.8648	14.1242	0.1872	0.0382

ตารางที่ 4.5 ผลของการรบกวนเด็กอ่อนของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.5$

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวน เด็กอ่อน (หน่วย)	ระยะตกท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสาย เคเบิลที่กิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยกิโล)
10	1.8822	2.6770	6.0499	8.7269	1.5791	7.8175	0.6215	5.1586
12	1.7643	3.3701	6.7656	10.1357	2.0943	8.3030	0.5501	3.3439
14	1.6905	4.0572	7.5253	11.5825	2.6095	8.7652	0.4978	2.3495
16	1.6398	4.7409	8.3081	13.0490	3.1248	9.1950	0.4569	1.7431
18	1.6028	5.4226	9.1047	14.5272	3.6402	9.5926	0.4237	1.3455
20	1.5747	6.1027	9.9101	16.0128	4.1556	9.9608	0.396	1.0706
22	1.5525	6.7820	10.7215	17.5035	4.6710	10.3025	0.3723	0.8722
24	1.5346	7.4605	11.5371	18.9976	5.1864	10.6210	0.3518	0.7244
26	1.5199	8.1385	12.3559	20.4944	5.7018	10.9188	0.3339	0.6114
28	1.5075	8.8161	13.1771	21.9932	6.2173	11.1982	0.3180	0.5229
30	1.4969	9.4934	14.0000	23.4934	6.7328	11.4613	0.3037	0.4523
32	1.4878	10.1704	14.8245	24.9949	7.2482	11.7098	0.2909	0.3952
34	1.4799	10.8472	15.6501	26.4973	7.7637	11.9452	0.2793	0.3482
36	1.4730	11.5238	16.4768	28.0006	8.2791	12.1687	0.2687	0.3092

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ระยะตกท้องช้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ความยาวของสาย เคเบิลที่เกิน (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
38	1.4668	12.2004	17.3041	29.5045	8.7946	12.3815	0.2591	0.2764
40	1.4614	12.8767	18.1322	31.0089	9.3100	12.5845	0.2501	0.2485
42	1.4564	13.5530	18.9608	32.5138	9.8256	12.7786	0.2419	0.2247
44	1.4520	14.2292	19.7899	34.0191	10.3410	12.9644	0.2343	0.2041
46	1.4480	14.9052	20.6195	35.5247	10.8565	13.1428	0.2272	0.1862
48	1.4443	15.5813	21.4493	37.0306	11.3720	13.3141	0.2205	0.1706
50	1.4410	16.2573	22.2795	38.5368	11.8874	13.4791	0.2143	0.1569
52	1.4379	16.9332	23.1100	40.0432	12.4029	13.6380	0.2085	0.1447
54	1.43500	17.6091	23.9406	41.5498	12.9185	13.7914	0.2031	0.1339
56	1.4324	18.2850	24.7716	43.0565	13.4339	13.9395	0.1979	0.1243
58	1.4300	18.9607	25.6027	44.5635	13.9494	14.0829	0.1930	0.1157
60	1.4277	19.6366	26.4340	46.0705	14.4649	14.2216	0.1885	0.1080

4.1.3.2 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง

จากหัวข้อ 3.4.2 เสาไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งเกิดการรบกวนเล็กน้อยซึ่งทำให้เอียงเป็นมุม τ กับแนวของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ควรจะเป็นคือ 90° งานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณา $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ ดังนั้น

ความสูงขณะที่ยาวสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$y_{P2} = y \sin(90^\circ - \tau) \quad (4.22)$$

โดยที่

$$\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$$

$$y = \frac{\cosh(1.1997)}{1.1997} x$$

ความสูงขณะที่ยาวสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

$$\eta_2 = y - y \sin(90^\circ - \tau) \quad (4.23)$$

ขนาดระยะห่างขณะที่ยาวสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงคือ

$$|\delta_2| = |y \cos(90^\circ - \tau)| \quad (4.24)$$

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยาวสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$c_{P2} = c + |\beta_2| \quad (4.25)$$

โดยที่

$$\beta_2 = \left| \sqrt{(y \sin(90^\circ - \tau))^2 - l^2} - c \right|$$

$$l = \frac{\sinh(1.1997)}{1.1997} x$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve_{P_2}} = 10 \log c_{P_2} \quad (4.26)$$

ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_{P_2} = y_{P_2} - c_{P_2} \quad (4.27)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss \text{ per unit length}_{P_2} = \frac{loss_{curve_{P_2}}}{2l} \quad (4.28)$$

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_{P_2}}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_{P_2}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y \sin(90^\circ - \tau)}{y} \right| \times 100 \\ &= \left| 1 - \sin(90^\circ - \tau) \right| \times 100 \end{aligned} \quad (4.29)$$

ผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากการเอียงของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นมุม $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ผลของการรบกวนความถี่ต่ำของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 1^\circ$

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวน ความถี่ก้น้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการรบกวน (หน่วย)	ระยะตกท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยละ)
10	0.0021	0.1317	3.3735	4.1698	7.5432	6.2011	0.4930	0.0152
12	0.0025	0.1580	4.0482	5.0037	9.0519	6.9930	0.4633	0.0152
14	0.0029	0.1843	4.7228	5.8377	10.5605	7.6624	0.4352	0.0152
16	0.0033	0.2107	5.3975	6.6717	12.0692	8.2423	0.4096	0.0152
18	0.0037	0.2370	6.0722	7.5056	13.5778	8.7539	0.3867	0.0152
20	0.0042	0.2633	6.7469	8.3396	15.0865	9.2114	0.3662	0.0152
22	0.0046	0.2897	7.4216	9.1735	16.5951	9.6254	0.3479	0.0152
24	0.0050	0.3160	8.0963	10.0075	18.1038	10.0033	0.3314	0.0152
26	0.0054	0.3423	8.7710	10.8415	19.6124	10.3509	0.3165	0.0152
28	0.0058	0.3687	9.4457	11.6754	21.1211	10.6727	0.3031	0.0152
30	0.0062	0.3950	10.1204	12.5094	22.6297	10.9724	0.2908	0.0152
32	0.0067	0.4213	10.7951	13.3433	24.1384	11.2526	0.2796	0.0152
34	0.0071	0.4477	11.4698	14.1773	25.6470	11.5159	0.2693	0.0152
36	0.0075	0.4740	12.1445	15.0112	27.1557	11.7642	0.2598	0.0152

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่างของการแขวน (หน่วย)	ระยะดักที่ห้องข้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของกรงแขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยกิโล)
38	0.0079	0.5003	12.8191	15.8452	28.6643	11.9990	0.2511	0.0152
40	0.0083	0.5267	13.4938	16.6792	30.1730	12.2217	0.2429	0.0152
42	0.0087	0.5530	14.1685	17.5131	31.6816	12.4336	0.2354	0.0152
44	0.0092	0.5793	14.8432	18.3471	33.1903	12.6357	0.2283	0.0152
46	0.0096	0.6057	15.5179	19.1810	34.6989	12.8287	0.2217	0.0152
48	0.0100	0.6320	16.1926	20.0150	36.2076	13.0136	0.2156	0.0152
50	0.0104	0.6583	16.8673	20.8489	37.7162	13.1908	0.2098	0.0152
52	0.0108	0.6847	17.5420	21.6829	39.2249	13.3612	0.2043	0.0152
54	0.0112	0.7110	18.2167	22.5169	40.7335	13.5251	0.1991	0.0152
56	0.0117	0.7373	18.8914	23.3508	42.2422	13.6830	0.1943	0.0152
58	0.0121	0.7637	19.5661	24.1848	43.7508	13.8354	0.1897	0.0152
60	0.0125	0.7900	20.2408	25.0187	45.2595	13.9827	0.1853	0.0152

ตารางที่ 4.7 ผลของการรวมความถี่ของเสาไฟฟ้าแรงสูงเรียงเป็น $\tau = 2^\circ$

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรวม ความถี่เล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการรวม (หน่วย)	ระยะตกท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
10	0.0083	0.2633	3.3638	4.1760	7.5398	6.2076	0.4936	0.0609
12	0.0100	0.3160	4.0365	5.0112	9.0478	6.9995	0.4638	0.0609
14	0.0117	0.3686	4.7093	5.8464	10.5557	7.6689	0.4355	0.0609
16	0.0133	0.4213	5.3820	6.6817	12.0637	8.2488	0.4099	0.0609
18	0.0150	0.4739	6.0548	7.5169	13.5716	8.7604	0.3870	0.0609
20	0.0167	0.5266	6.7275	8.3521	15.0796	9.2179	0.3664	0.0609
22	0.0183	0.5793	7.4003	9.1873	16.5876	9.6319	0.3481	0.0609
24	0.0200	0.6319	8.0730	10.0225	18.0955	10.0098	0.3316	0.0609
26	0.0216	0.6846	8.7458	10.8577	19.6035	10.3574	0.3167	0.0609
28	0.0233	0.7372	9.4186	11.6929	21.1114	10.6792	0.3032	0.0609
30	0.0250	0.7899	10.0913	12.5281	22.6194	10.9789	0.2910	0.0609
32	0.0266	0.8425	10.7641	13.3633	24.1274	11.2591	0.2797	0.0609
34	0.0283	0.8952	11.4368	14.1985	25.6353	11.5224	0.2694	0.0609
36	0.0300	0.9479	12.1096	15.0337	27.1433	11.7707	0.2600	0.0609

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่างของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกท้องข้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของแขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยกิโล)
38	0.0316	1.0005	12.7823	15.8689	28.6512	12.0055	0.2512	0.0609
40	0.0333	1.0532	13.4551	16.7041	30.1592	12.2282	0.2431	0.0609
42	0.0350	1.1058	14.1278	17.5393	31.6672	12.4401	0.2355	0.0609
44	0.0366	1.1585	14.8006	18.3745	33.1751	12.6422	0.2284	0.0609
46	0.0383	1.2112	15.4733	19.2098	34.6831	12.8352	0.2218	0.0609
48	0.0400	1.2638	16.1461	20.0450	36.1910	13.0201	0.2157	0.0609
50	0.0416	1.3165	16.8188	20.8802	37.6990	13.1973	0.2099	0.0609
52	0.0433	1.3691	17.4916	21.7154	39.2070	13.3677	0.2044	0.0609
54	0.0450	1.4218	18.1643	22.5506	40.7149	13.5316	0.1992	0.0609
56	0.0466	1.4745	18.8371	23.3858	42.2229	13.6895	0.1944	0.0609
58	0.0483	1.5271	19.5099	24.2210	43.7309	13.8419	0.1897	0.0609
60	0.0500	1.5798	20.1826	25.0562	45.2388	13.9892	0.1854	0.0609

ตารางที่ 4.8 ผลของการรบกวนความถี่สูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงซึ่งเป็น $\tau = 3^\circ$

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเด็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่างของการแฉก (หน่วย)	ระยะตกท้องช้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของกาแฉกสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียความยาว (dB/หน่วย)	แรงดันที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยโวลต์)
10	0.0187	0.3948	3.3476	4.1865	7.5341	6.2185	0.4944	0.1370
12	0.0225	0.4738	4.0171	5.0237	9.0409	7.0103	0.4645	0.1370
14	0.0262	0.5528	4.6866	5.8610	10.5477	7.6797	0.4361	0.1370
16	0.0300	0.6317	5.3562	6.6983	12.0545	8.2597	0.4104	0.1370
18	0.0337	0.7107	6.0257	7.5356	13.5613	8.7712	0.3874	0.1370
20	0.0375	0.7897	6.6952	8.3729	15.0681	9.2288	0.3669	0.1370
22	0.0412	0.8687	7.3647	9.2102	16.5749	9.6427	0.3485	0.1370
24	0.0450	0.9476	8.0343	10.0475	18.0817	10.0206	0.3320	0.1370
26	0.0487	1.0266	8.7038	10.8848	19.5886	10.3682	0.3171	0.1370
28	0.0525	1.1056	9.3733	11.7221	21.0954	10.6900	0.3035	0.1370
30	0.0562	1.1845	10.0428	12.5594	22.6022	10.9897	0.2913	0.1370
32	0.0600	1.2635	10.7123	13.3967	24.1090	11.2700	0.2800	0.1370
34	0.0637	1.3425	11.3819	14.2339	25.6158	11.5333	0.2697	0.1370
36	0.0675	1.4214	12.0514	15.0712	27.1226	11.7815	0.2602	0.1370

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกที่ท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยกะ)
38	0.0712	1.5004	12.7209	15.9085	28.6294	12.0163	0.2514	0.1370
40	0.0750	1.5794	13.3904	16.7458	30.1362	12.2391	0.2433	0.1370
42	0.0787	1.6583	14.0599	17.5831	31.6430	12.4510	0.2357	0.1370
44	0.0825	1.7373	14.7295	18.4204	33.1499	12.6530	0.2286	0.1370
46	0.0862	1.8163	15.3990	19.2577	34.6567	12.8460	0.2220	0.1370
48	0.0900	1.8952	16.0685	20.0950	36.1635	13.0309	0.2158	0.1370
50	0.0937	1.9742	16.7380	20.9323	37.6703	13.2082	0.2100	0.1370
52	0.0975	2.0532	17.4075	21.7696	39.1771	13.3785	0.2046	0.1370
54	0.1012	2.1322	18.0771	22.6069	40.6839	13.5424	0.1994	0.1370
56	0.1050	2.2111	18.7466	23.4441	42.1907	13.7003	0.1945	0.1370
58	0.1087	2.2901	19.4161	24.2814	43.6975	13.8527	0.1899	0.1370
60	0.1125	2.3691	20.0856	25.1187	45.2044	14.0000	0.1855	0.1370

ในการทำงานเดียวกัน มีการรบกวนเล็กน้อยเกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำให้เอียงเป็นมุม $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ กับแนวของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ควรจะเป็นคือ 90° แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้น ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$y_{P3} = y \sin(90^\circ + \tau) = y \sin(90^\circ - \tau) = y_{P2} \quad (4.30)$$

โดยที่

$$\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$$

$$y = \frac{\cosh(1.1997)}{1.1997} x$$

ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

$$\eta_3 = y - y \sin(90^\circ + \tau) = y - y \sin(90^\circ - \tau) = \eta_2 \quad (4.31)$$

ขนาดระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงคือ

$$|\delta_3| = |y \cos(90^\circ + \tau)| = |y \cos(90^\circ - \tau)| = |\delta_2| \quad (4.32)$$

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$c_{P3} = c - |\beta_3| \quad (4.33)$$

โดยที่

$$\beta_3 = \left| c + \sqrt{(y \sin(90^\circ + \tau))^2 - l^2} \right| = \left| \sqrt{(y \sin(90^\circ - \tau))^2 - l^2} - c \right| = \beta_2$$

$$l = \frac{\sinh(1.1997)}{1.1997} x$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากรัศมีความโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss_{curve_{P3}} = 10 \log C_{P3} \quad (4.34)$$

ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$h_{P3} = y_{P3} - C_{P3} \quad (4.35)$$

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเกิดการรบกวนเล็กน้อย คือ

$$loss \text{ per unit length}_{P3} = \frac{loss_{curve_{P3}}}{2l} \quad (4.36)$$

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง คือ

$$\begin{aligned} \left| \frac{T - T_{P3}}{T} \right| \times 100 &= \left| \frac{wy - wy_{P3}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y \sin(90^\circ + \tau)}{y} \right| \times 100 \\ &= \left| 1 - \sin(90^\circ + \tau) \right| \times 100 \\ &= \left| 1 - \sin(90^\circ - \tau) \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{y - y \sin(90^\circ - \tau)}{y} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{wy - wy_{P2}}{wy} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{T - T_{P2}}{T} \right| \times 100 \end{aligned} \quad (4.37)$$

ผลลัพธ์ของค่าต่างๆที่ได้จากการเอียงของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นมุม $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม สำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 ผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงเป็น $\tau = 1^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย กวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกท้องช้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
10	0.0021	0.1317	3.3776	4.1656	7.5432	6.1968	0.4927	0.0152
12	0.0025	0.1580	4.0531	4.9988	9.0519	6.9886	0.4630	0.0152
14	0.0029	0.1843	4.7287	5.8319	10.5605	7.6581	0.4349	0.0152
16	0.0033	0.2107	5.4042	6.6650	12.0692	8.2380	0.4094	0.0152
18	0.0037	0.2370	6.0797	7.4981	13.5778	8.7495	0.3865	0.0152
20	0.0042	0.2633	6.7552	8.3313	15.0865	9.2071	0.3660	0.0152
22	0.0046	0.2897	7.4308	9.1644	16.5951	9.6210	0.3477	0.0152
24	0.0050	0.3160	8.1063	9.9975	18.1038	9.9989	0.3312	0.0152
26	0.0054	0.3423	8.7818	10.8306	19.6124	10.3465	0.3164	0.0152
28	0.0058	0.3687	9.4573	11.6638	21.1211	10.6684	0.3029	0.0152
30	0.0062	0.3950	10.1329	12.4969	22.6297	10.9680	0.2907	0.0152
32	0.0067	0.4213	10.8084	13.3300	24.1384	11.2483	0.2795	0.0152
34	0.0071	0.4477	11.4839	14.1631	25.6470	11.5116	0.2692	0.0152
36	0.0075	0.4740	12.1594	14.9963	27.1557	11.7598	0.2597	0.0152

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการแขวน (หน่วย)	ระยะดกที่iongข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยละ)
38	0.0079	0.5003	12.8350	15.8294	28.6643	11.9946	0.2510	0.0152
40	0.0083	0.5267	13.5105	16.6625	30.1730	12.2174	0.2428	0.0152
42	0.0087	0.5530	14.1860	17.4956	31.6816	12.4293	0.2353	0.0152
44	0.0092	0.5793	14.8615	18.3288	33.1903	12.6313	0.2282	0.0152
46	0.0096	0.6057	15.5371	19.1619	34.6989	12.8244	0.2217	0.0152
48	0.0100	0.6320	16.2126	19.9950	36.2076	13.0092	0.2155	0.0152
50	0.0104	0.6583	16.8881	20.8281	37.7162	13.1865	0.2097	0.0152
52	0.0108	0.6847	17.5636	21.6613	39.2249	13.3568	0.2042	0.0152
54	0.0112	0.7110	18.2392	22.4944	40.7335	13.5207	0.1991	0.0152
56	0.0117	0.7373	18.9147	23.3275	42.2422	13.6787	0.1942	0.0152
58	0.0121	0.7637	19.5902	24.1606	43.7508	13.8311	0.1896	0.0152
60	0.0125	0.7900	20.2657	24.9938	45.2595	13.9783	0.1852	0.0152

ตารางที่ 4.10 ผลของการรบกวนความถี่ต่ำของเสาไฟฟ้าแรงสูงเรียงเป็น $\tau = 2^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวน ความถี่ต่ำ (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยคะ)
10	0.0083	0.2633	3.3804	4.1594	7.5398	6.1903	0.4922	0.0609
12	0.0100	0.3160	4.0565	4.9913	9.0478	6.9821	0.4626	0.0609
14	0.0117	0.3686	4.7326	5.8231	10.5557	7.6516	0.4345	0.0609
16	0.0133	0.4213	5.4087	6.6550	12.0637	8.2315	0.4090	0.0609
18	0.0150	0.4739	6.0848	7.4869	13.5716	8.7430	0.3862	0.0609
20	0.0167	0.5266	6.7608	8.3188	15.0796	9.2006	0.3658	0.0609
22	0.0183	0.5793	7.4369	9.1506	16.5876	9.6145	0.3475	0.0609
24	0.0200	0.6319	8.1130	9.9825	18.0955	9.9924	0.3310	0.0609
26	0.0216	0.6846	8.7891	10.8144	19.6035	10.3400	0.3162	0.0609
28	0.0233	0.7372	9.4652	11.6463	21.1114	10.6619	0.3027	0.0609
30	0.0250	0.7899	10.1413	12.4782	22.6194	10.9615	0.2905	0.0609
32	0.0266	0.8425	10.8173	13.3100	24.1274	11.2418	0.2793	0.0609
34	0.0283	0.8952	11.4934	14.1419	25.6353	11.5051	0.2690	0.0609
36	0.0300	0.9479	12.1695	14.9738	27.1433	11.7533	0.2596	0.0609

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่างของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกท้องช้างของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึงสายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของงาแขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสียกำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
38	0.0316	1.0005	12.8456	15.8057	28.6512	11.9881	0.2508	0.0609
40	0.0333	1.0332	13.5217	16.6375	30.1592	12.2109	0.2427	0.0609
42	0.0350	1.1058	14.1978	17.4694	31.6672	12.4228	0.2352	0.0609
44	0.0366	1.1585	14.8738	18.3013	33.1751	12.6248	0.2281	0.0609
46	0.0383	1.2112	15.5499	19.1332	34.6831	12.8179	0.2215	0.0609
48	0.0400	1.2638	16.2260	19.9650	36.1910	13.0027	0.2154	0.0609
50	0.0416	1.3165	16.9021	20.7969	37.6990	13.1800	0.2096	0.0609
52	0.0433	1.3691	17.5782	21.6288	39.2070	13.3503	0.2041	0.0609
54	0.0450	1.4218	18.2543	22.4607	40.7149	13.5142	0.1990	0.0609
56	0.0466	1.4745	18.9303	23.2925	42.2229	13.6722	0.1941	0.0609
58	0.0483	1.5271	19.6064	24.1244	43.7309	13.8246	0.1895	0.0609
60	0.0500	1.5798	20.2825	24.9563	45.2388	13.9718	0.1851	0.0609

ตารางที่ 4.11 ผลของการรบกวนความถี่ของเสาไฟฟ้าแรงสูงเรียงเป็น $\tau = 3^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวน ความถี่ก้นอ้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการกระจาย (หน่วย)	ระยะตกที่ท้องช้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยตะ)
10	0.0187	0.3948	3.3851	4.1490	7.5341	6.1794	0.4913	0.1370
12	0.0225	0.4738	4.0621	4.9788	9.0409	6.9712	0.4619	0.1370
14	0.0262	0.5528	4.7391	5.8085	10.5477	7.6407	0.4339	0.1370
16	0.0300	0.6317	5.4162	6.6383	12.0545	8.2206	0.4085	0.1370
18	0.0337	0.7107	6.0932	7.4681	13.5613	8.7321	0.3857	0.1370
20	0.0375	0.7897	6.7702	8.2979	15.0681	9.1897	0.3653	0.1370
22	0.0412	0.8687	7.4472	9.1277	16.5749	9.6036	0.3471	0.1370
24	0.0450	0.9476	8.1242	9.9575	18.0817	9.9815	0.3307	0.1370
26	0.0487	1.0266	8.8012	10.7873	19.5886	10.3291	0.3159	0.1370
28	0.0525	1.1056	9.4783	11.6171	21.0954	10.6510	0.3024	0.1370
30	0.0562	1.1845	10.1553	12.4469	22.6022	10.9506	0.2902	0.1370
32	0.0600	1.2635	10.8323	13.2767	24.1090	11.2309	0.2790	0.1370
34	0.0637	1.3425	11.5093	14.1065	25.6158	11.4942	0.2688	0.1370
36	0.0675	1.4214	12.1863	14.9363	27.1226	11.7424	0.2593	0.1370

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

ระยะห่างของเสา ไฟฟ้าแรงสูง (หน่วย)	ผลของการรบกวนเล็กน้อย (หน่วย)	ผลต่อระยะห่าง ของการแขวน (หน่วย)	ระยะตกที่ท้องข้าง ของสายเคเบิล (หน่วย)	ระยะจากพื้นถึง สายเคเบิล (หน่วย)	ความสูงของการ แขวนสายเคเบิล (หน่วย)	ค่าการสูญเสีย กำลังแสง (dB)	ค่าการสูญเสียต่อ ความยาว (dB/หน่วย)	แรงดึงที่เปลี่ยน แปลง (ร้อยกะ)
38	0.0712	1.5004	12.8634	15.7661	28.6294	11.9772	0.2506	0.1370
40	0.0750	1.5794	13.5404	16.5959	30.1362	12.2000	0.2425	0.1370
42	0.0787	1.6583	14.2174	17.4256	31.6430	12.4119	0.2350	0.1370
44	0.0825	1.7373	14.8944	18.2554	33.1499	12.6139	0.2279	0.1370
46	0.0862	1.8163	15.5714	19.0852	34.6567	12.8070	0.2214	0.1370
48	0.0900	1.8952	16.2485	19.9150	36.1635	12.9918	0.2152	0.1370
50	0.0937	1.9742	16.9255	20.7448	37.6703	13.1691	0.2094	0.1370
52	0.0975	2.0532	17.6025	21.5746	39.1771	13.3394	0.2040	0.1370
54	0.1012	2.1322	18.2795	22.4044	40.6839	13.5033	0.1988	0.1370
56	0.1050	2.2111	18.9565	23.2342	42.1907	13.6613	0.1940	0.1370
58	0.1087	2.2901	19.6336	24.0640	43.6975	13.8137	0.1894	0.1370
60	0.1125	2.3691	20.3106	24.8938	45.2044	13.9609	0.1850	0.1370

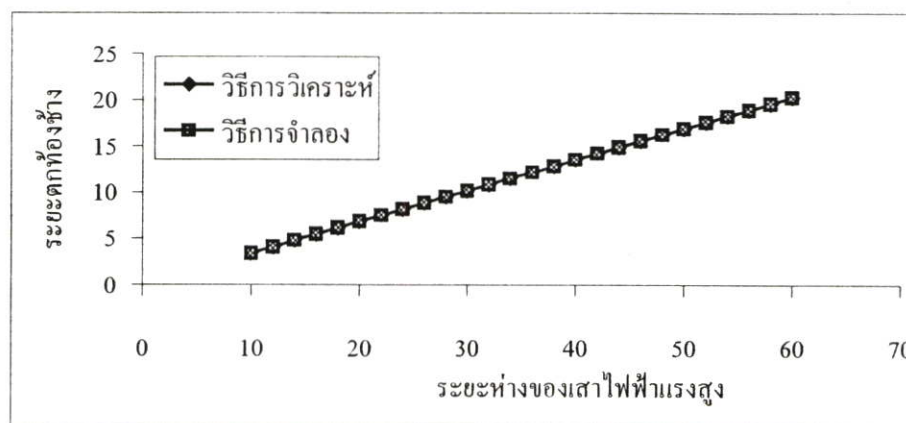
4.2 เปรียบเทียบผลของงานวิจัย

ในหัวข้อนี้ จะนำผลของงานวิจัยที่ได้จากหัวข้อ 4.1 มาเปรียบเทียบกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ซึ่งจะเปรียบเทียบ ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน เกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง และพิจารณาผลที่เกิดจากการรบกวนเล็กน้อย คือ แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละ ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดที่เปลี่ยนแปลงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน และขนาดระยะห่างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเกิดการรบกวนเล็กน้อยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

4.2.1 เปรียบเทียบผลของวิธีการจำลอง

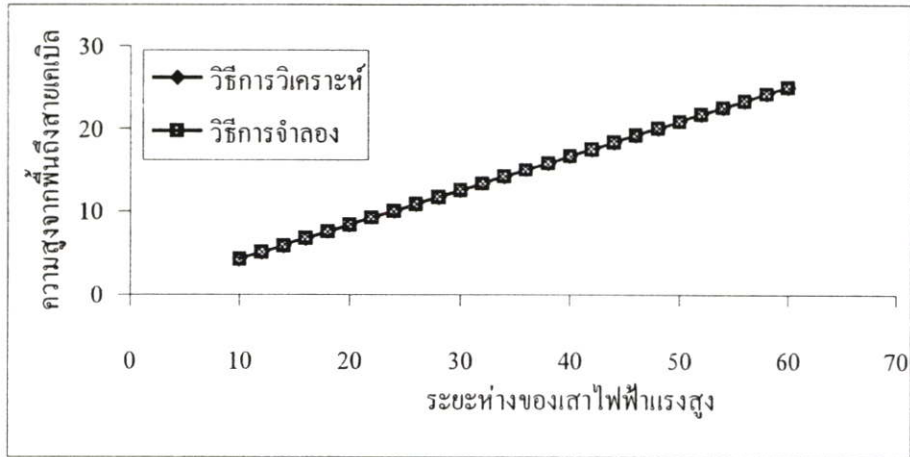
นำผลของวิธีการจำลองจากตารางที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2 ดังนี้

ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1



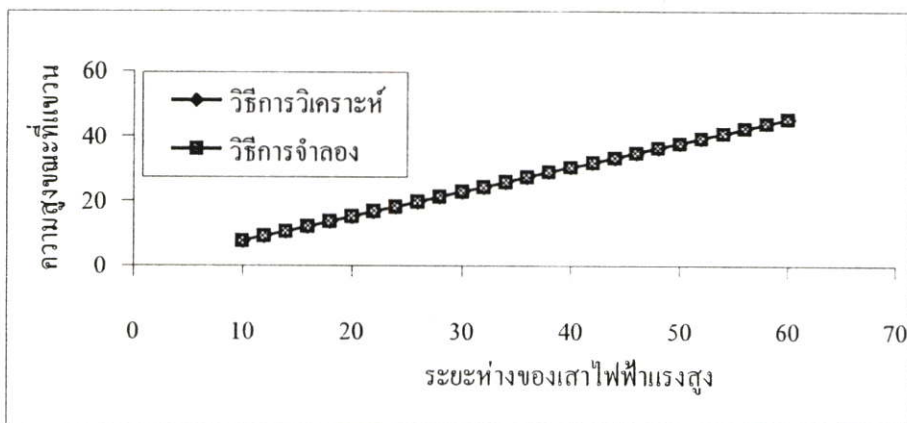
รูปที่ 4.1 ระยะตกท้องข้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2



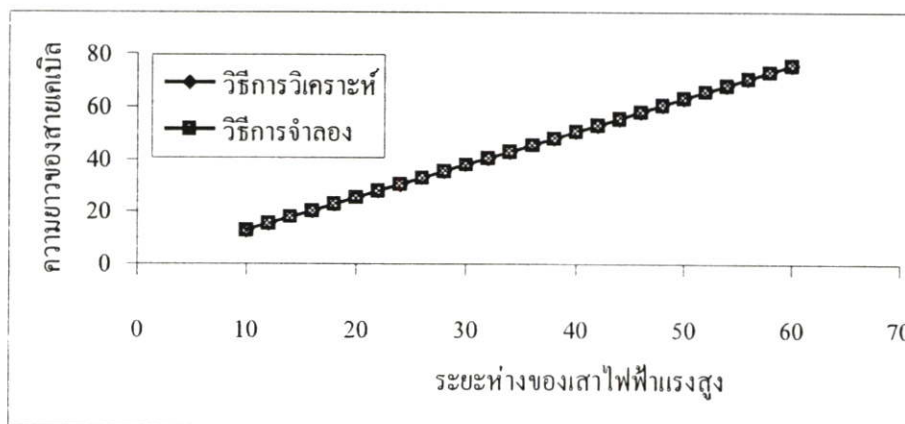
รูปที่ 4.2 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.3



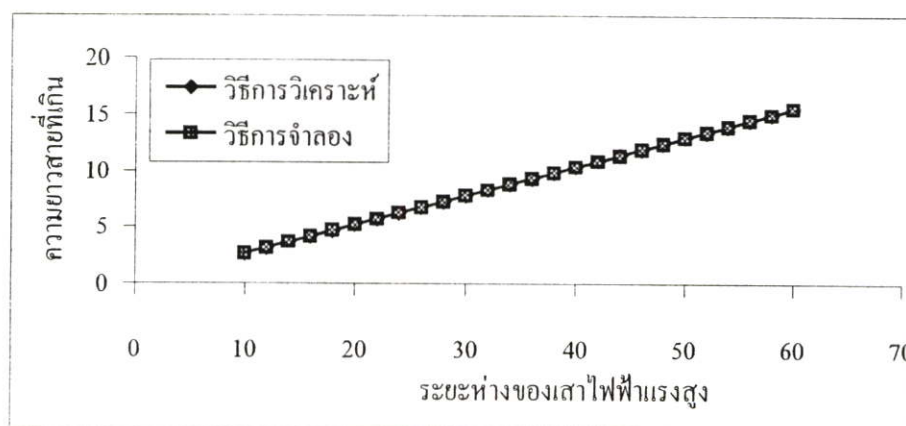
รูปที่ 4.3 ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4



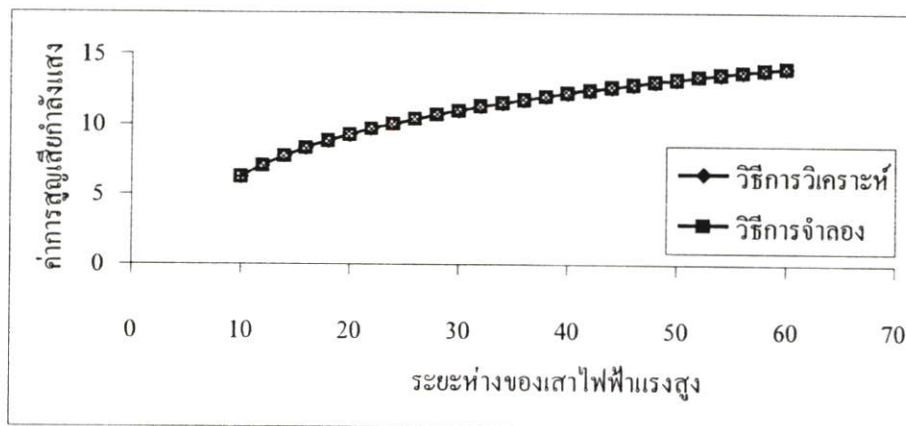
รูปที่ 4.4 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5



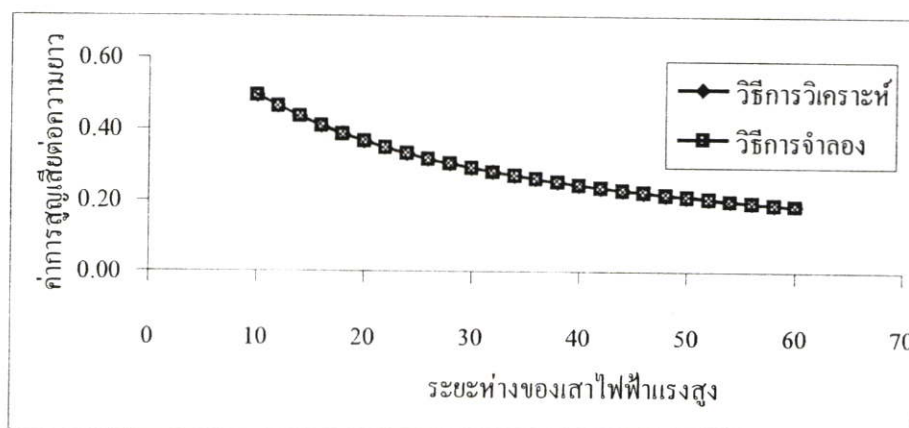
รูปที่ 4.5 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์หามีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์หามีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7

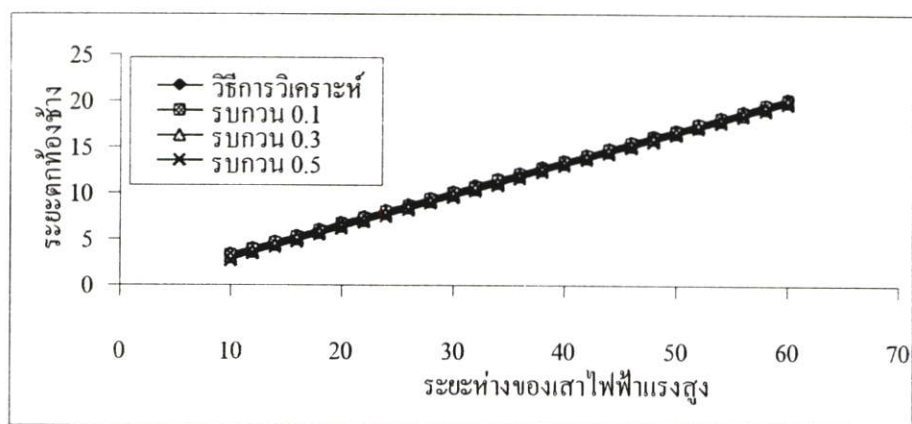


รูปที่ 4.7 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากวิธีการจำลองและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

4.2.2 เปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

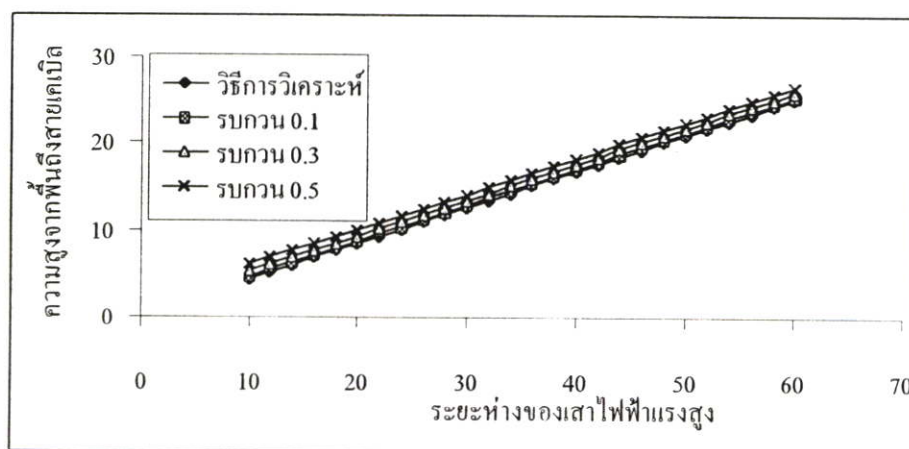
นำผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นระยะ $\delta_1 = 0.1, 0.3, 0.5$ จากตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 มาเปรียบเทียบกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2 ดังนี้

ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8



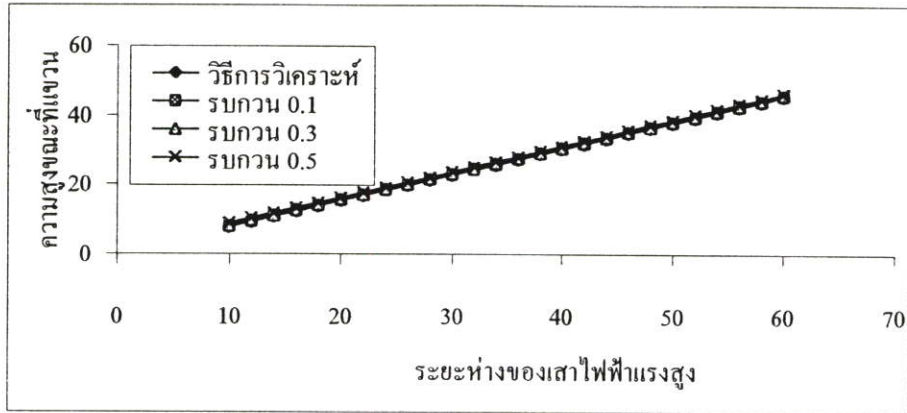
รูปที่ 4.8 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.9



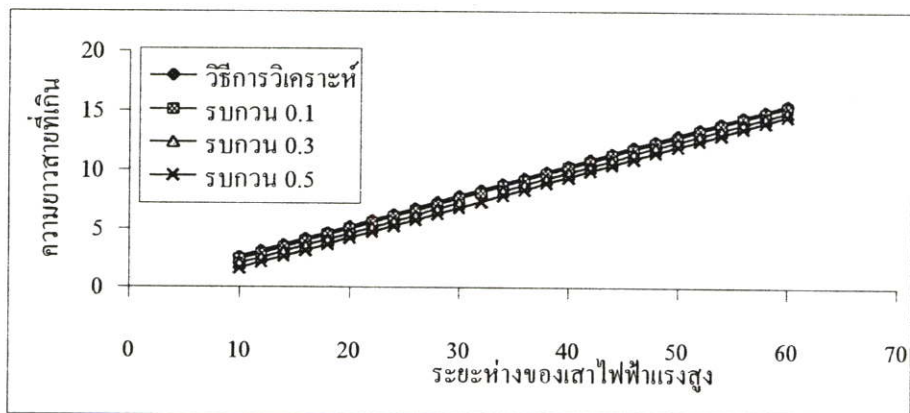
รูปที่ 4.9 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10



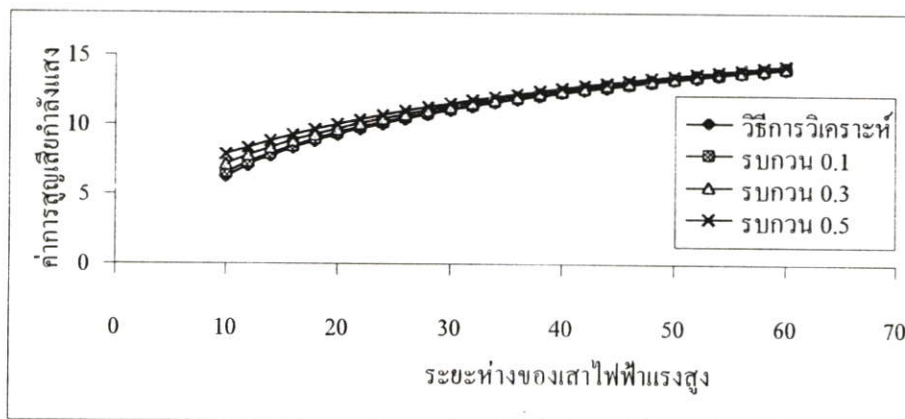
รูปที่ 4.10 ความสูงขณะที่ยานสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยานเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.11



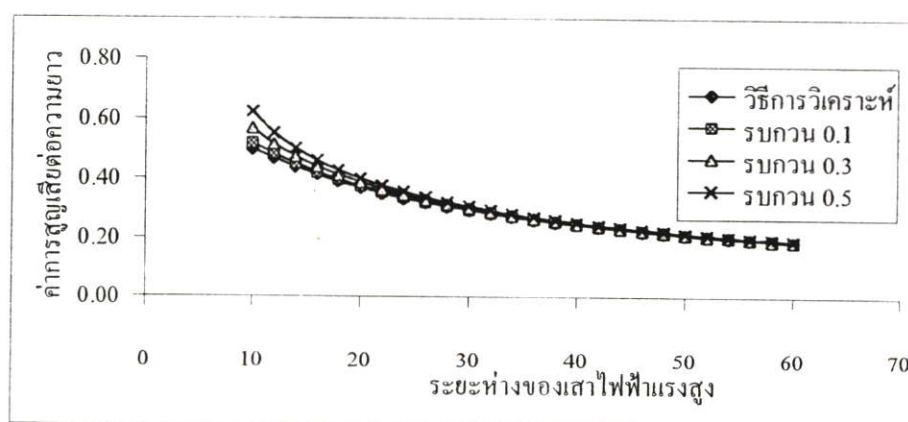
รูปที่ 4.11 ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยานเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.12



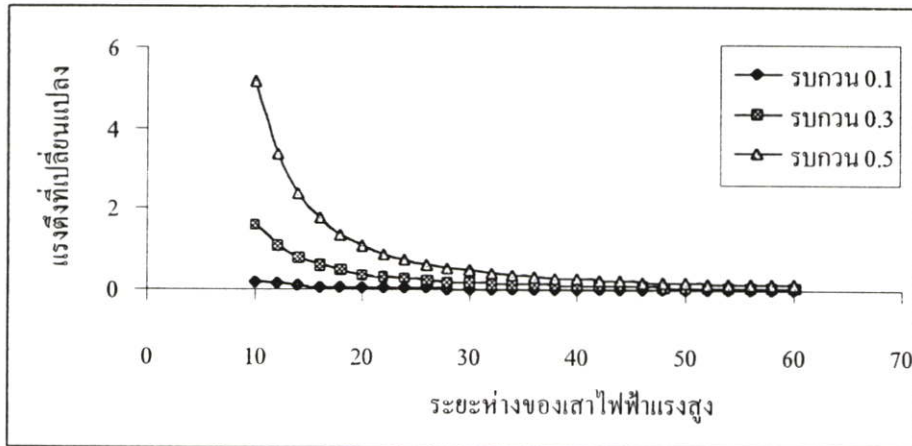
รูปที่ 4.12 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการรบกวนเล็กน้อยและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการรบกวนเล็กน้อยเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14

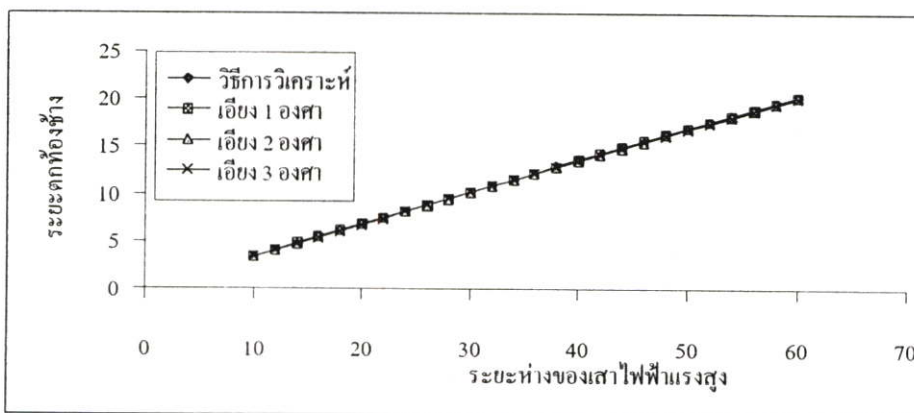


รูปที่ 4.14 ร้อยละของแรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการรบกวนเล็กน้อย

4.2.3 เปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูง

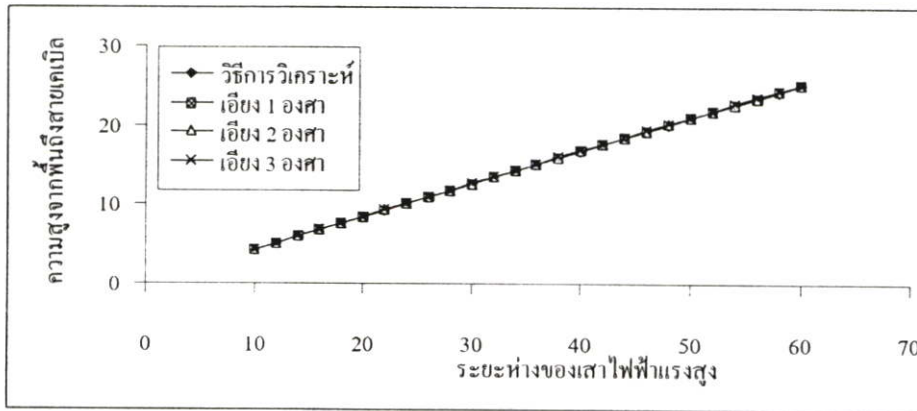
นำผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ทำเอียงเป็นมุม $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ จากตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 มาเปรียบเทียบกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2 ดังนี้

ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.15



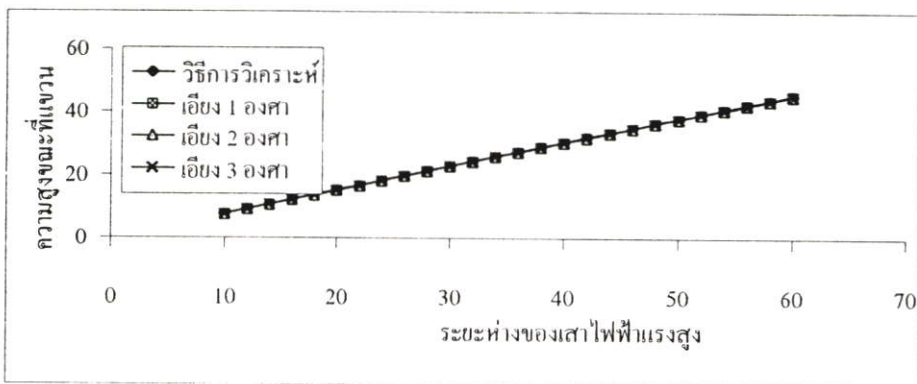
รูปที่ 4.15 ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.16



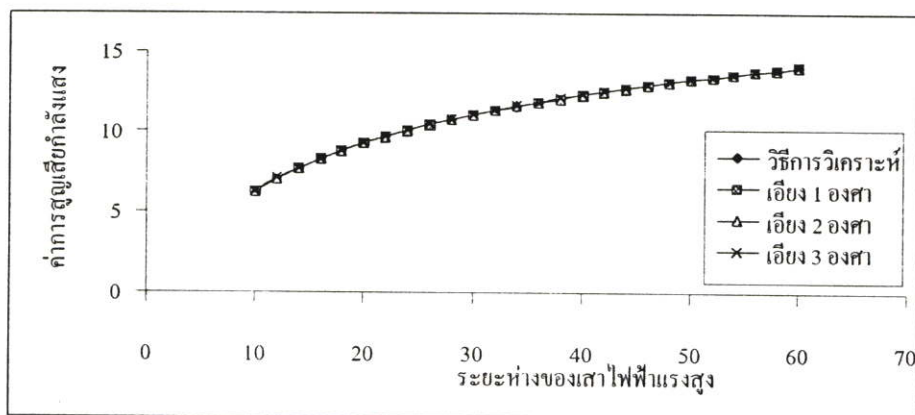
รูปที่ 4.16 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงขณะที่ยื่นสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.17



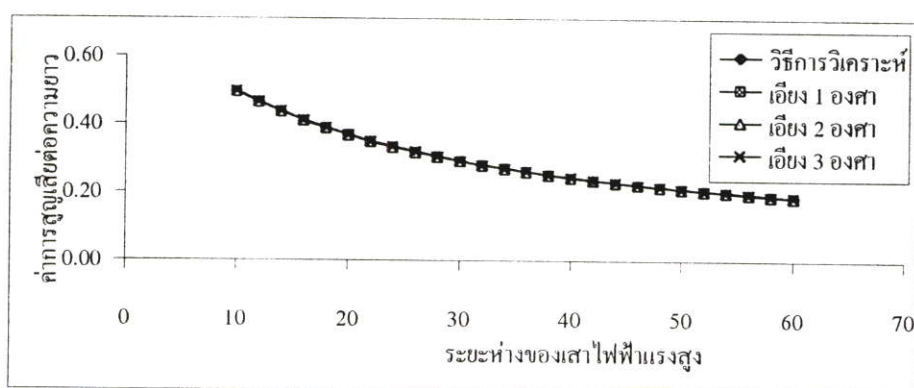
รูปที่ 4.17 ความสูงขณะที่ยื่นสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.18



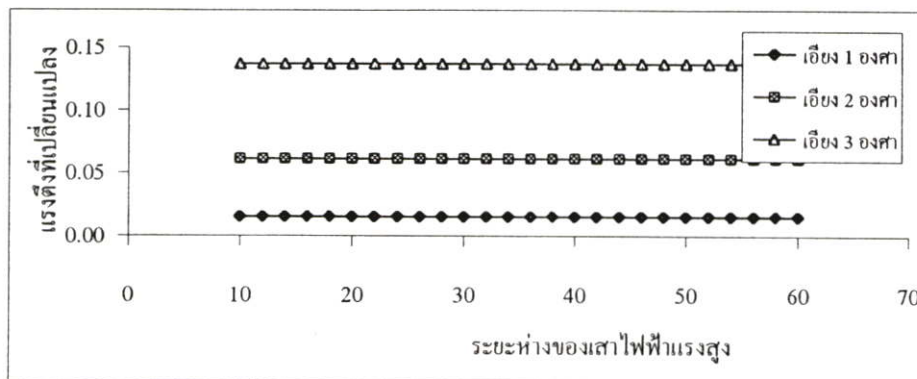
รูปที่ 4.18 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการเอียงและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

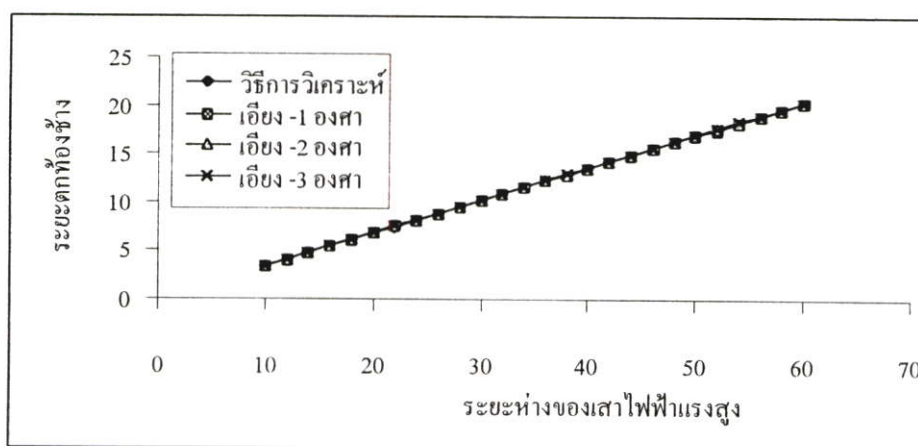
แรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นร้อยละสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการรบกวนเล็กน้อยเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าคงที่สำหรับแต่ละการรบกวนเล็กน้อย แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ร้อยละของแรงดึงของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการเอียง

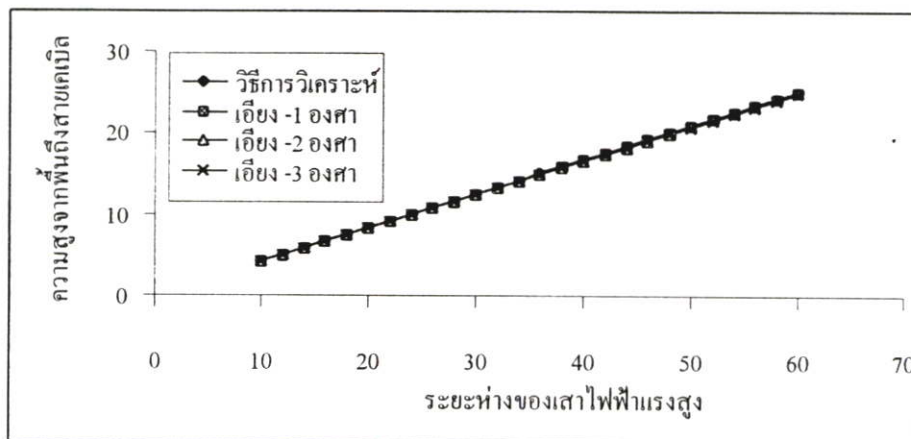
ในทำนองเดียวกัน นำผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ทำเอียงเป็นมุม $\tau = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ ในทิศทางตรงข้าม จากตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 มาเปรียบเทียบกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2 ดังนี้

ระยะดกท้องข้างขณะที่ยาวสายเคเบิลใยแก้วนำแสงสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.21



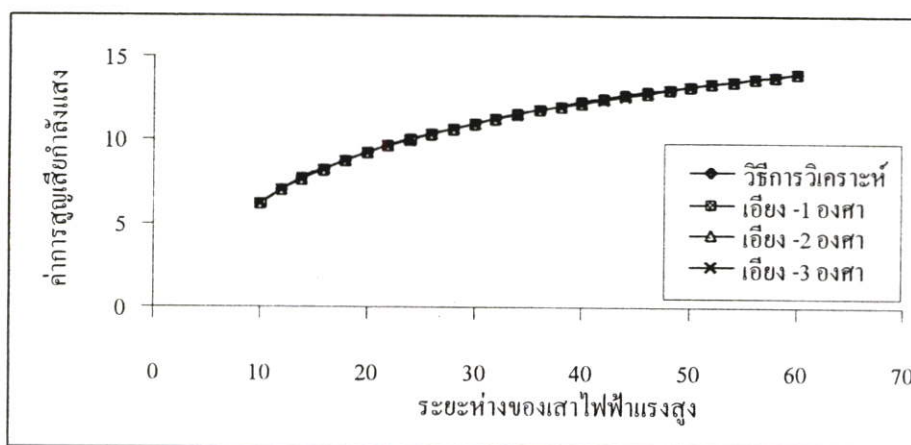
รูปที่ 4.21 ระยะดกท้องข้างขณะที่ยาวสายเคเบิลใยแก้วนำแสงจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.22



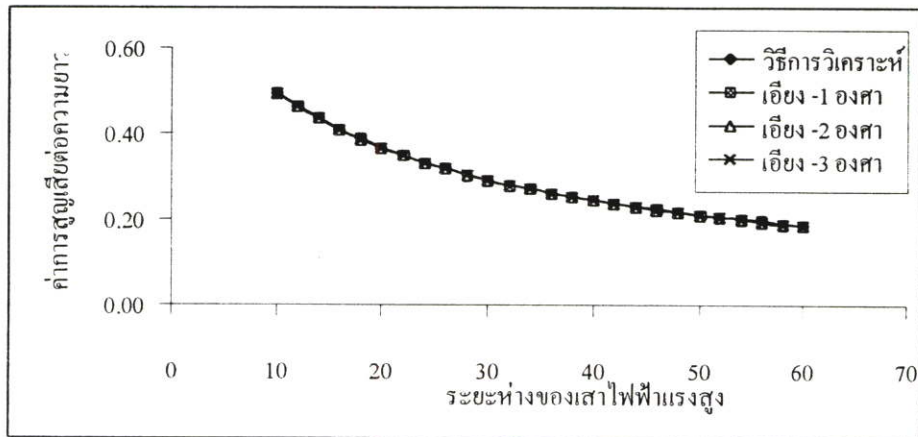
รูปที่ 4.22 ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่ยื่นจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากการรบกวนเล็กน้อยมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยจากการเอียงทิศทางตรงข้ามและวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

บทที่ 5

สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ จะสรุปผลของงานวิจัยที่ได้จากบทที่ 4 ซึ่งมีผลของวิธีการจำลอง ผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และผลของการรบกวนเล็กน้อย และมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยฉบับนี้

5.1 สรุปผลของงานวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการจำลองกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ถ้าพิจารณาผลลัพธ์ที่มีทศนิยมเดียวกันแล้วผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีการนั้นเท่ากัน

เมื่อเปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ พบว่า เมื่อการรบกวนเล็กน้อยเพิ่มขึ้นสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วย และร้อยละของแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความยาวของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนเกินกว่าระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงมีค่าลดลง และพบว่า เมื่อระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้นสำหรับแต่ละการรบกวนเล็กน้อย ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยและร้อยละของแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกันมากกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบผลของการรบกวนเล็กน้อยของเสาไฟฟ้าแรงสูงกับผลของวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ พบว่า เมื่อเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงทำมุม $90^\circ \pm \tau$ กับพื้นดินสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงและร้อยละของแรงดึงน้อยสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากัน พบว่า เมื่อเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงทำมุม $90^\circ - \tau$ กับพื้นดินสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนและค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ความสูงขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงมีค่าลดลง พบว่า เมื่อเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงทำมุม $90^\circ + \tau$ กับพื้นดินสำหรับแต่ละระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูง

ความสูงจากพื้นถึงตำแหน่งต่ำสุดของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวน ค่าการสูญเสียกำลังแสงจากการโค้งงอของสายเคเบิลใยแก้วนำแสงขณะที่แขวนและค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยมีค่าลดลง แต่ระยะตกท้องช้างขณะที่แขวนสายเคเบิลใยแก้วนำแสงมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อเสาไฟฟ้าแรงสูงเอียงทำมุม $90^\circ \pm \tau$ กับพื้นดิน ระยะห่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้น และ τ มีค่าน้อยๆ แล้วค่าการสูญเสียกำลังแสงต่อความยาวหนึ่งหน่วยมีค่าใกล้เคียงกันมากกับวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการพิจารณากรณีแบบสมมาตรกับแนวแกน y และสมการเป็นแบบแคทีนารี ดังนั้น สามารถนำไปใช้วิจัยในกรณีแบบไม่สมมาตรกับแนวแกน y สมการแบบอื่นได้ และพิจารณาการรบกวนเล็กน้อยเป็นค่าอื่นๆ ให้เหมาะสมกับสถานการณ์ในปัจจุบันซึ่งต้องพิจารณาพารามิเตอร์อื่นประกอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Louis Leithold. **The Calculus with Analytic Geometry**. Sixth Edition. New York : Harper Collins Publishers. 1990.
- [2] ปรีชา ชูพาพิน. **เครือข่ายใยแก้วนำแสง**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ส. เอเซียเพลส จำกัด. 2541.
- [3] Frederick C. Allard. **Fiber Optics Handbook for Engineers and Scientists**. U.S.A. : McGraw-Hill. 1990.
- [4] กัศลินี ชิตสกุล. **Vector-Valued Functions**. เอกสารประกอบการสอน. 2544.
- [5] Alan W. Bush. **Perturbation Methods for Engineers and Scientist**. Florida : CRC Press, Inc.. 1992.
- [6] วารี เกรอต. **แคลคูลัส**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์เอ็มพันธ์ จำกัด. 2539.
- [7] กัศลินี ชิตสกุล. **แคลคูลัสการแปรผัน**. เอกสารประกอบการสอน. 2539.
- [8] Cecil W. Koehler. "Analysis of Basic Position Loop Control Systems". Conference of IEEE on Industry Applications Society annual Meeting. 1989, vol.2, pp. 1656-1662.
- [9] Yo-seob Lee and Soon-ill Hong. "A Study on Maintaining Control of Tension for a Catenary's Cable". Proceeding of ISIE International Symposium on Industrial Electronics. 2001, vol.1, pp. 581-585.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายกัมปนาท นามงาม

วัน เดือน ปี เกิด

17 พฤศจิกายน 2517

สถานที่เกิด

จังหวัดราชบุรี

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตรบัณฑิต(คณิตศาสตร์)

สถานศึกษาที่สำเร็จ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษาที่สำเร็จ

2538