

การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM สำหรับกราฟิกชนิดมัลติลาสต์เมื่อ
โครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโนด



นาย คุณนันท์ ลือกิจนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MULTICAST TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM NETWORK FOR SINGLE NODE
FAILURE DESIGN

Mr. Kunanan Luekijna

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490752

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM
สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหาย
หนึ่งโหนด

โดย

นาย คุณนันท์ ลือกิจนา

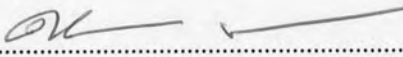
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา

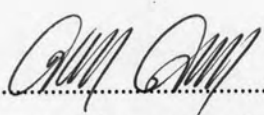
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตร

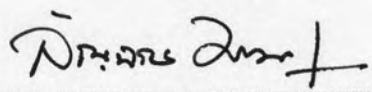
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

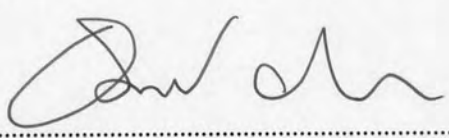

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตร)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลักษณ วุฒิสีทธิกุลกิจ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวนิติศ อัสกุล)

คุณนันท์ ลือภิกษา : การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM สำหรับ
 ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด (MULTICAST
 TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM NETWORK FOR SINGLE NODE
 FAILURE DESIGN) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตร, จำนวน 133 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอปัญหาผลการศึกษาสองปัญหาที่สำคัญของโครงข่าย W D M (Wavelength Division Multiplexing) ที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ สำหรับปัญหาแรกที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคือ ปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ของโครงข่าย W D M และปัญหาที่สองที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคือ ปัญหาการป้องกันโครงข่าย W D M จากความเสียหายหนึ่งโหนด ซึ่งได้นำวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Reconfiguration of entire network ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้อีกแล้ว[22] และนำเสนอแนวทางการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี Reconfiguration of traffic traversing through failure node และ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่น่าสนใจจะหลีกเลี่ยงโหนดที่ขัดข้องในเส้นทางที่ไม่ซ้ำโหนด(Node Disjoint) ซึ่งทั้งสองปัญหานี้มีวัตถุประสงค์ร่วมในการศึกษาคือ เพื่อทำการออกแบบโครงข่าย W D M ให้สามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด โดยพิจารณาในประเด็นของจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ และวิทยานิพนธ์นี้ยังได้พิจารณาถึงความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงหนึ่งเส้นรวมไปถึงลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายว่ามีผลอย่างไรต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของระบบ ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์จะใช้เทคนิค Integer linear programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด หรือจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมีค่าต่ำที่สุด

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา


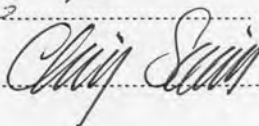
4770283521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD : MULTICASTING/ WDM NETWORK/ ROUTING AND WAVELENGTH
ASSIGNMENT/ ILP/ NODE FAILURE.

KUNANAN LUEKIJNA : MULTICAST TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM
NETWORK FOR SINGLE NODE FAILURE DESIGN.THESIS ADVISOR : ASST.
PROF.DR CHAIYACHET SAIVICHIT , 133 PP

The thesis studies two problems in optical WDM networks design that supports multicast traffic. Firstly, the multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) problem that are studied . Whereas, the second problem studies the problem of provisioning protection systems to enable WDM network to survive a single node failure. The study was based on previously proposed algorithm; Reconfiguration of entire network. In this thesis two reconfiguration methods are proposed; namely; Reconfiguration of traffic traversing through failure node and Reconfiguration of traffic adjacent to failure node. Both proposed methods consider node disjoint protection.

As started, work in this thesis is concerned with the design WDM network to support multicast traffic in normal or single node failure of conditions. Not only this thesis considers the number of fiber requirement but also the influence of the maximum wavelengths multiplexed per fiber and wavelength conversion on fiber requirement. Integer linear programming (ILP) technique are used to obtain the fiber requirement of each reconfigure method.

Department Electrical Engineering Student's Signature 
Field of study Electrical Engineering Advisor's Signature 
Academic Year 2006

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตรอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขาวนดิศ อัสวกุล ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่างๆรวมไปถึงคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดี ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณกำพล วรดิษฐ์ คุณอนุชิต มั่นจิรังกูร คุณกนกภรณ์ วิสเพ็ญและคุณวรางรัตน์ วัฒนวรากุล สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือที่มีให้มาโดยตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณความคิดเห็นดีๆและข้อเสนอแนะในมุมมองที่แตกต่าง กำลังใจ และแรงสนับสนุนจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกคน ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 คีท วิศวกรรมไฟฟ้า4 ที่ทำให้การศึกษาริยญยามหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยของข้าพเจ้าเต็มไปด้วยความทรงจำที่ดีและมีคุณค่า

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรักความอบอุ่น ความเอาใจใส่ ในทุกเรื่องของข้าพเจ้าอย่างบริสุทธิ์ใจ และขอบคุณพี่สาวที่คอยห่วงใยและคอยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

| บทที่ | หน้า |
|-------|--|
| 3 | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์23 |
| | 3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network model).....23 |
| | 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย ต้องการ26 |
| | 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง.....22 |
| | 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานใน สภาวะปกติ27 |
| | 3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายมีความ เสียหายหนึ่งโหนด29 |
| | 3.5.1 Reconfiguration of entire network29 |
| | 3.5.1.1 กรณี VLT.....30 |
| | 3.5.1.2 กรณี LT.....31 |
| | 3.5.2 Reconfiguration of traffic traversing through failure node32 |
| | 3.5.2.1 กรณี VLT.....32 |
| | 3.5.2.2 กรณี LT.....33 |
| | 3.5.3 Reconfiguration of traffic adjacent to failure node34 |
| | 3.5.3.1 กรณี VLT.....35 |
| | 3.5.3.2 กรณี LT.....36 |
| 4 | ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยการทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้38 |
| | 4.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์38 |
| | 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ41 |
| | 4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณี โครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ41 |
| | 4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณี โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด.....43 |
| | 4.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่าย46 |
| | 4.3.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณี โครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ46 |
| | 4.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณี โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด.....48 |

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 49 |
| 4.4.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. ในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ..... | 49 |
| 4.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. ในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด | 52 |
| 4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ..... | 56 |
| 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 57 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 57 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 59 |
| รายการอ้างอิง..... | 60 |
| ภาคผนวก..... | 62 |
| ภาคผนวก ก จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหาย หนึ่งโหนด | 63 |
| ภาคผนวก ข อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหาย หนึ่งโหนด | 84 |
| ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด..... | 105 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 133 |

สารบัญตาราง

| ตารางประกอบ | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ..... | 42 |
| ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 44 |
| ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ..... | 47 |
| ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 49 |
| ตารางที่ 4.5 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานสภาวะการใช้งานปกติ..... | 51 |
| ตารางที่ 4.6 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานสภาวะการใช้งานปกติ..... | 52 |
| ตารางที่ 4.7 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 54 |
| ตารางที่ 4.8 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 55 |
| ตารางที่ ก.1 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 1 เสียหาย..... | 77 |
| ตารางที่ ก.2 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 2 เสียหาย..... | 77 |
| ตารางที่ ก.3 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 3 เสียหาย..... | 78 |
| ตารางที่ ก.4 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 4 เสียหาย..... | 78 |
| ตารางที่ ก.5 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 5 เสียหาย..... | 79 |
| ตารางที่ ก.6 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 6 เสียหาย..... | 79 |
| ตารางที่ ก.7 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 7 เสียหาย..... | 80 |
| ตารางที่ ก.8 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 8 เสียหาย..... | 80 |
| ตารางที่ ก.9 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 9 เสียหาย..... | 81 |
| ตารางที่ ก.10 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 10 เสียหาย..... | 81 |
| ตารางที่ ก.11 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 11 เสียหาย..... | 82 |
| ตารางที่ ก.12 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 12 เสียหาย..... | 82 |
| ตารางที่ ก.13 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 13 เสียหาย..... | 83 |
| ตารางที่ ก.14 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 14 เสียหาย..... | 83 |
| ตารางที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 1 เสียหาย(%)..... | 98 |
| ตารางที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 2 เสียหาย(%)..... | 98 |
| ตารางที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 3 เสียหาย(%)..... | 99 |
| ตารางที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 4 เสียหาย(%)..... | 99 |
| ตารางที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 5 เสียหาย(%)..... | 100 |
| ตารางที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 6 เสียหาย(%)..... | 100 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 โครงข่ายที่รองรับมัลติคาสต์และข่ายเชื่อมโยงแบบต้นไม้เชิงแสงระหว่างกลุ่ม โหนด | 2 |
| รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น | 8 |
| รูปที่ 2.2 โครงข่าย WDM แบบมัลติคาสต์กับต้นไม้เชิงแสง | 8 |
| รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC | 9 |
| รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC กับความสามารถในการเปลี่ยนความยาวคลื่น | 10 |
| รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดเส้นทางบน โครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง | 11 |
| รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเส้นทางบน โครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง | 11 |
| รูปที่ 2.7 ลักษณะการจัดเส้นทางบน โครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง | 12 |
| รูปที่ 2.8 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบน โครงข่าย WDMแบบวิธี โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง | 13 |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบน โครงข่าย WDMแบบวิธี โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน | 13 |
| รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการบูรณะความเสียหายภายในโครงข่าย | 14 |
| รูปที่ 2.11 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทาง | 15 |
| รูปที่ 2.12 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับการเชื่อมต่อ | 16 |
| รูปที่ 2.13 เส้นทางสำรองที่เส้นทางอื่นไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ | 16 |
| รูปที่ 2.14 เส้นทางสำรองสามารถใช้งานร่วมกันได้ในเวลาที่ต่างกัน | 17 |
| รูปที่ 2.15 เส้นทางหลักสามารถใช้งานร่วมกับเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองเส้นอื่น | 17 |
| รูปที่ 2.16 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of entire network | 19 |
| รูปที่ 2.17 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of traffic traversing through failure node | 20 |
| รูปที่ 2.18 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node | 21 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง..... | 38 |
| รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลย..... | 39 |
| รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลย(ต่อ)..... | 39 |
| รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ..... | 42 |
| รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด | 44 |
| รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ | 47 |
| รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด | 48 |
| รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ..... | 50 |
| รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ | 51 |
| รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 53 |
| รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด..... | 55 |
| รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการกระจายทราฟฟิกออกจากบริเวณที่เสียหายของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ที่นำเสนอวิธี TT และ AD..... | 56 |
| รูปที่ ก.1 โหนด1เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 63 |
| รูปที่ ก.2 โหนด1เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 63 |
| รูปที่ ก.3 โหนด2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 64 |
| รูปที่ ก.4 โหนด2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 64 |
| รูปที่ ก.5 โหนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 65 |
| รูปที่ ก.6 โหนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 65 |
| รูปที่ ก.7 โหนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 66 |
| รูปที่ ก.8 โหนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 66 |
| รูปที่ ก.9 โหนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 67 |
| รูปที่ ก.10 โหนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 67 |
| รูปที่ ก.11 โหนด6เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 68 |
| รูปที่ ก.12 โหนด6เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 68 |
| รูปที่ ก.13 โหนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 69 |
| รูปที่ ก.14 โหนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 69 |
| รูปที่ ก.15 โหนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 70 |
| รูปที่ ก.16 โหนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 70 |
| รูปที่ ก.17 โหนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น..... | 71 |
| รูปที่ ก.18 โหนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น | 71 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ ค.25 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง ผันความยาวคลื่น..... | 117 |
| รูปที่ ค.26 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ แปลงผันความยาวคลื่น | 117 |
| รูปที่ ค.27 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง ผันความยาวคลื่น..... | 118 |
| รูปที่ ค.28 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ แปลงผันความยาวคลื่น | 118 |