

การบูรณะโครงข่ายโดยใช้ค่าปัจจัยการกระจายโหลดเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับค่าสมรรถนะความอยู่รอด
ของโครงข่าย



นายธีระวัฒน์ ไกรฤกษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

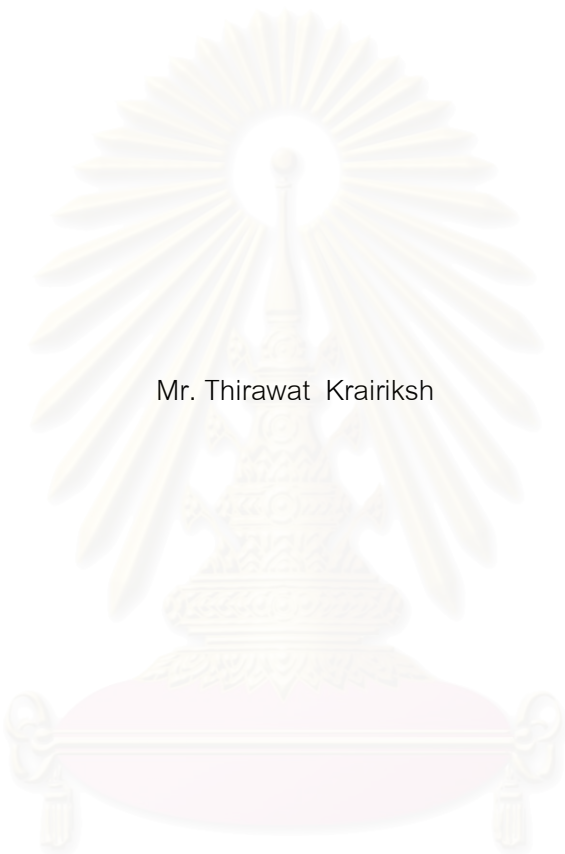
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2571-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NETWORK RESTORATION UTILIZING LOAD DISTRIBUTION FACTOR AS SURVIVABILITY
PERFORMANCE INDEX

Mr. Thirawat Krairiksh



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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


ISBN 974-14-2571-6


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การบูรณะโครงข่ายโดยใช้ค่าปัจจัยการกระจายโหลดเป็นดัชนีชี้วัด
ประสิทธิภาพสำหรับค่าสมรรถนะความอยู่รอดของโครงข่าย
โดย นายธีระวัฒน์ ไกรฤกษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หน้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัดถญกร วุฒิสิทิกุลกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขาวนิตศ อิศวกุล)

ธีระวัฒน์ ไกรฤกษ์ : การบูรณะโครงข่ายโดยใช้ค่าปัจจัยการกระจายโหลดเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับค่าสมรรถนะความอยู่รอดของโครงข่าย (NETWORK RESTORATION UTILIZING LOAD DISTRIBUTION FACTOR AS SURVIVABILITY PERFORMANCE INDEX)
 อ. ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. ชัยเชษฐีย์ สายวิจิตร, จำนวนหน้า 102 หน้า. ISBN 974-14-2571-6.

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นเราสามารถเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่ายได้โดยใช้วิธีการบูรณะ และวิธีการบูรณะที่สามารถทำได้ง่ายวิธีหนึ่งคือการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงซึ่งจะทำการหาเส้นทางบูรณะที่อยู่โดยรอบความเสียหายที่เกิดขึ้น แนวความคิดหลักของแบบจำลองที่นำเสนอนี้จะพิจารณาถึงการกระจายโหลดในการหาเส้นทางบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง โดยมีเป้าหมายหลักอยู่ที่การกระจายกราฟฟิกรที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางบูรณะต่างๆ อย่างเหมาะสม ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวทางแก้ปัญหาเพื่อปรับปรุงการกระจายโหลดของวิธีการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงสามแนวทางคือการหาเส้นทางของวิธีแรกนั้นข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำกว่าจะมีโอกาสถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะมากกว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานสูง วิธีที่สองสามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมและลดการแย่งชิงความจุสำรองด้วยการพิจารณาค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงและความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ ส่วนวิธีที่สามเป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีข้างต้นในการเลือกใช้เส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำและพิจารณาความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ของแต่ละเส้นทางด้วย นอกจากนี้ได้นำเสนอดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อประเมินถึงประสิทธิภาพของวิธีการบูรณะที่ใช้ในการกระจายกราฟฟิกรที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางบูรณะ

ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการบูรณะที่นำเสนอทำให้การกระจายโหลดของโครงข่ายภายหลังการเกิดความเสียหายดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นทางบูรณะที่สั้นที่สุด นอกจากนี้การทดสอบยังสามารถรับประกันอัตราการบูรณะที่เท่ากับหรือดีกว่าการใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยแม้ว่าปริมาณกราฟฟิกรโดยรวมของโครงข่ายเพิ่มขึ้นหรือค่าความจุสำรองของโครงข่ายลดลง และดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่นำเสนอก็สามารถแสดงค่าความอยู่รอดของโครงข่ายในขอบเขตที่กำหนดไว้ได้อย่างเหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ธีระวัฒน์

ไกรฤกษ์

(Handwritten signatures)

4670693021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: SURVIVABILITY / PERFORMANCE INDEX / LOAD DISTRIBUTION /
RESTORATION / LINK UTILIZATION / RESTORATION RATIO

THIRAWAT KRAIRIKSH: NETWORK RESTORATION UTILIZING LOAD
DISTRIBUTION FACTOR AS SURVIVABILITY PERFORMANCE INDEX. THESIS
ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYACHET SAIVICHIT, Ph.D., 102 pp. ISBN: 974-14-
2571-6.

In an event of failure, Network survivability performance could be demonstrated through restoration. Link restoration is the simplest restoration technique provided by determining paths around a failed link. The key idea of the proposed model is to consider load distribution in path computation. In other words, it distributes the disrupted traffic among all restoration paths. Our aim is to improve the load distribution level in link restoration. Therefore, the modified restoration schemes are proposed in order to consider load distribution in path computation by using link restoration technique. In the first scheme, spare capacities will be reserved by the lighter-loaded route prior to the heavier-loaded route. The second scheme can find the optimum paths and reduce resource contention with consideration of available spare capacities. The third scheme uses the advantages of the above schemes with consideration of link utilization and available spare capacities. Furthermore, we propose a novel performance index for evaluating how well the restoration scheme can distribute the disrupted traffic among restoration paths.

By using our proposed restoration scheme, the network load distribution is improved, compared with the shortest path scheme. The outcome of the restoration ratio are also improved equally well when traffic demands are increased or spare capacities is insufficient. Experimental results show that our proposed index forms a good representation of survivability value.

Department Electrical Engineering
Field of study Electrical Engineering
Academic year 2006

Student's signature Thirawat Krairiksh
Advisor's signature Chaiyachet Saivichit

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ชัยเชษฐ สหายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ. ดร. เซาวนดิศ อัครกุล ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยอย่างยิ่ง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์ภทรชาติ สำหรับคำปรึกษาและข้อคิดเห็นดีๆ ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณเพื่อนๆ กลุ่มสัมมนาเน็ตเวิร์กทุกคน ไม่ว่าจะเป็น พี่ตา พี่ก้อย พี่มิ่ง โบ โอ ชาย มิก ก้อง อาร์ต ส้ม กัส ที่ร่วมกันแสดงความคิดเห็นซึ่งช่วยให้เกิดการพัฒนาทางด้านวิชาการมากยิ่งขึ้น และยังทำให้บรรยากาศในการทำวิจัยเป็นไปอย่างสนุกสนาน ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสื่อสารซึ่งเป็นสถานที่ในการทำวิจัย และเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆ ด้าน

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านกรวิจัยและพัฒนา (Cooperative Project between Department of Electrical Engineering and Private sector for Research and Development) ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา และที่สำคัญคือกำลังใจและความเข้าใจที่มีให้ข้าพเจ้าเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3. วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์.....	5
1.4. ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	6
1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7. ประมวลวิทยานิพนธ์.....	7
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1. คำจำกัดความ.....	8
2.2. ความอยู่รอดของโครงข่าย.....	8
2.2.1. รูปแบบการเกิดความเสียหาย.....	10
2.2.1.1. ระบุการเกิดความเสียหาย.....	10
2.2.1.2. สุ่มการเกิดความเสียหาย.....	10
2.3. วิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่าย.....	11
2.3.1. ขั้นตอนการสร้างเส้นทางสำรอง.....	12
2.3.1.1. เฟสกระจายข่าว.....	12
2.3.1.2. เฟสตอบรับ.....	13
2.3.1.3. เฟสยืนยัน.....	14
2.3.2. การป้องกันความเสียหาย.....	15
2.3.2.1. การป้องกันความเสียหายในระดับเส้นทาง.....	15

บทที่	หน้า
2.3.2.2. การป้องกันความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยง.....	15
2.3.3. การบูรณะความเสียหาย.....	15
2.3.3.1. การบูรณะความเสียหายระดับเส้นทาง.....	16
2.3.3.2. การบูรณะความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยง.....	16
2.3.4. การบูรณะแบบวางแผน.....	16
2.3.5. การเลือกใช้วิธีการสร้างเส้นทางสำรอง.....	17
2.3.6. การบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงโดยวิธีหาเส้นทางสั้นที่สุดและหาการไหล ที่มากที่สุด.....	19
2.3.7. การคำนวณค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย.....	21
2.4. การกระจายโหลด.....	21
2.5. ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ.....	23
2.5.1. ค่าความอยู่รอดของโครงข่ายสำหรับชั้นกายภาพ.....	24
2.5.2. Excess loss due to failure.....	24
2.5.3. Degree of disturbance.....	25
2.5.4. การเลือกใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ.....	25
2.6. แนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์.....	26
3. การออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพและการบูรณะที่นำเสนอ.....	28
3.1. แบบจำลองโครงข่าย.....	28
3.2. การบูรณะแบบวางแผนที่นำเสนอ.....	30
3.2.1. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด.....	30
3.2.1.1. ส่วนสร้างเส้นทาง.....	31
3.2.1.2. ส่วนกำหนดกราฟฟิก.....	32
3.2.2. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง.....	34
3.2.2.1. ส่วนสร้างเส้นทาง.....	34
3.2.2.2. ส่วนกำหนดกราฟฟิก.....	35
3.2.3. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง.....	40
3.2.3.1. ส่วนสร้างเส้นทาง.....	40
3.2.3.2. ส่วนกำหนดกราฟฟิก.....	40
3.2.4. ตัวอย่างการทำงานของวิธีที่นำเสนอ.....	41
3.2.4.1. การคำนวณของส่วนสร้างเส้นทาง.....	42

บทที่	หน้า
3.2.4.2. การคำนวณของส่วนกำหนดกราฟฟิก.....	43
3.3. ค่าการกระจายไหลด.....	45
3.4. สรุปสิ่งที่นำเสนอ.....	47
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	48
4.1. สภาพแวดล้อมของการจำลองและทดสอบ.....	48
4.1.1. พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนในการทดสอบ.....	48
4.1.2. ดัชนีชี้วัดที่ใช้ออกถึงประสิทธิภาพของการบูรณะ.....	49
4.2. ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	50
4.2.1. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของไหลด.....	51
4.2.1.1. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก).....	51
4.2.1.2. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข).....	56
4.2.1.3. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค).....	58
4.2.2. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง.....	60
4.2.2.1. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก).....	60
4.2.2.2. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข).....	66
4.2.2.3. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค).....	67
4.2.3. วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของไหลดและความจุสำรอง.....	69
4.2.3.1. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก).....	69
4.2.3.2. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข).....	76
4.2.3.3. ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค).....	78
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก.....	87
ภาคผนวก ข.....	89
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นเพื่อกำหนดเทคนิคความอยู่รอด.....	9
ตารางที่ 2.2 วิธีการสร้างเส้นทางสำรอง.....	11
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการหาการไหลที่มากที่สุด.....	20
ตารางที่ 3.1 ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	29
ตารางที่ 3.2 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของวิธี LWR.....	31
ตารางที่ 3.3 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของวิธี SWR.....	34
ตารางที่ 3.4 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.9) ถึง (3.12).....	36
ตารางที่ 3.4 รูปแบบในการกำหนดกราฟฟิกแบบ ก.....	43
ตารางที่ 3.5 ผลการกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะแบบ ข. (วิธีวนซ้ำ).....	44
ตารางที่ 3.7 ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ (3.15) ถึง (3.21).....	45



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การป้องกันและบูรณะความเสียหาย.....	12
รูปที่ 2.2 เฟสกระจายข่าวสำหรับการบูรณะระดับชายเชื่อมโยง.....	13
รูปที่ 2.3 การแจ้งความเสียหายสำหรับการบูรณะระดับเส้นทาง.....	13
รูปที่ 2.4 เฟสตอบรับ.....	14
รูปที่ 2.5 เฟสยืนยัน.....	14
รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างการบูรณะระดับเส้นทางและชายเชื่อมโยง.....	18
รูปที่ 2.7 การใช้ความจูงใจของร่วมกันสำหรับการบูรณะระดับชายเชื่อมโยง.....	25
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเส้นทางบูรณะสำหรับการบูรณะระดับชายเชื่อมโยง.....	26
รูปที่ 3.1 การทำงานของวิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของไหลด.....	33
รูปที่ 3.2 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนสร้างเส้นทาง.....	38
รูปที่ 3.3 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนกำหนดกราฟฟิก.....	39
รูปที่ 3.4 โครงข่ายตัวอย่าง.....	41
รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
รูปที่ 4.2 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	51
รูปที่ 4.3 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	52
รูปที่ 4.4 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	52
รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายไหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	53
รูปที่ 4.6 ค่าการกระจายไหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	53
รูปที่ 4.7 ค่าการกระจายไหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	53
รูปที่ 4.8 ค่าใช้งานความจูงใจของโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อชายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	54

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.9 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	54
รูปที่ 4.10 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	54
รูปที่ 4.11 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 60 เปอร์เซ็นต์.....	55
รูปที่ 4.12 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	55
รูปที่ 4.13 อัตราการบวมระเฉดลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	57
รูปที่ 4.14 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	57
รูปที่ 4.15 ค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย (ข) ก่อนเกิดความเสียหาย ที่ปริมาณ ทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	57
รูปที่ 4.16 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	58
รูปที่ 4.17 อัตราการบวมระเฉดลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	59
รูปที่ 4.18 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	59
รูปที่ 4.19 ค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย (ข) ก่อนเกิดความเสียหาย ที่ปริมาณ ทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	59
รูปที่ 4.20 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ค) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (6, 12) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	60
รูปที่ 4.21 อัตราการบวมระเฉดลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	61
รูปที่ 4.22 อัตราการบวมระเฉดลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	61
รูปที่ 4.23 อัตราการบวมระเฉดลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	61

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.24 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	63
รูปที่ 4.25 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	63
รูปที่ 4.26 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	63
รูปที่ 4.27 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	64
รูปที่ 4.28 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	64
รูปที่ 4.29 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	64
รูปที่ 4.30 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 60 เปอร์เซ็นต์.....	65
รูปที่ 4.31 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	65
รูปที่ 4.32 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	66
รูปที่ 4.33 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	66
รูปที่ 4.34 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	67
รูปที่ 4.35 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	68
รูปที่ 4.36 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ค) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	68
รูปที่ 4.37 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ค) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	68
รูปที่ 4.38 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	70

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.39 อัตราการบรูณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	70
รูปที่ 4.40 อัตราการบรูณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	70
รูปที่ 4.41 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	71
รูปที่ 4.42 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	71
รูปที่ 4.43 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	71
รูปที่ 4.44 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์.....	73
รูปที่ 4.45 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	73
รูปที่ 4.46 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	73
รูปที่ 4.47 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 60 เปอร์เซ็นต์.....	74
รูปที่ 4.48 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 70 เปอร์เซ็นต์.....	75
รูปที่ 4.49 อัตราการบรูณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	77
รูปที่ 4.50 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	77
รูปที่ 4.51 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	77
รูปที่ 4.52 อัตราการบรูณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	78
รูปที่ 4.53 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ค) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....	78

รูปที่ 4.54 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (6, 12) เสียหาย
ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 55 เปอร์เซ็นต์.....79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจากการพัฒนาทางด้านธุรกิจ ส่งผลให้การพัฒนาศักยภาพของโครงข่ายสื่อสารเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางและวิธีการพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารที่ น่าเชื่อถือมากขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมา ศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ในส่วนสุดท้ายนั้นเป็นประมวล วิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันทั้งในด้านธุรกิจ การค้าขาย การ ประชุม และการบันเทิง เนื่องมาจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีการสื่อสารในปัจจุบัน ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถส่งข้อมูลที่ต้องการติดต่อในปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว ไม่เพียงข้อมูล ตัวหนังสือ หรือเสียงธรรมดาเท่านั้น ยังรวมไปถึงสัญญาณมัลติมีเดียต่างๆ ทั้งรูปภาพ วิดีทัศน์ ระบบการประชุมทางไกล สัญญาณเหล่านี้ต้องการอัตราข้อมูลและความถูกต้องในการรับส่ง ข้อมูลสูง อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานของสัญญาณที่มีอยู่จำกัดอีกด้วย ส่งผลให้ ข้อมูลข่าวสารที่ใช้ติดต่อนั้นมีความสำคัญมากขึ้น หากว่าข่าวสารนั้นขาดหายไปเพียงเล็กน้อยก็ อาจทำให้เกิดผลเสียได้ การออกแบบโครงข่ายให้สามารถรองรับกับปริมาณความต้องการของ ผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอเป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบโครงข่ายแต่สิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณา ควบคู่ไปด้วยคือ ความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) ของโครงข่ายสื่อสารเพราะผู้ใช้งานต้องการความ ต่อเนื่องของการติดต่อสื่อสาร ถึงแม้ในกรณีที่อุปกรณ์ของโครงข่ายเกิดความเสียหายหรือชำรุดขึ้น ก็ยังสามารถใช้บริการต่อได้โดยที่คุณภาพของบริการไม่ได้ลดลงเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ ความสามารถในการบริการของโครงข่ายหลังจากความเสียหายที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า ความอยู่รอด ของโครงข่าย (Network survivability) [1]-[4]

เมื่อมีอุปกรณ์ของโครงข่ายได้รับความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อปริมาณข้อมูลจำนวน มาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ดีต้องทำให้โครงข่ายมีความทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น (Fault-tolerant network) โดยเฉพาะเมื่อสายใยแก้วถูกตัดขาดซึ่งเป็นความเสียหายที่พบบ่อยที่สุด

ดังนั้นวิธีที่จะยกระดับความอยู่รอดของโครงข่ายได้ก็คือต้องมีวิธีจัดการกับความเสียหายอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้เส้นทางสำรอง (Backup path) เพื่อรองรับผลกระทบจากความเสียหายของทราฟฟิกใช้งาน โดยต้องมีกระบวนการสร้างเส้นทางป้องกัน (Protection process) และเส้นทางบูรณะ (Restoration process) ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้การใช้ความจุที่วางลงไปในนั้นเกิดประโยชน์มากที่สุด ในงานวิจัย [5] ได้กล่าวถึงความเชื่อมโยงกันของการป้องกันและการบูรณะแบบต่างๆ ด้วยการอธิบายให้เห็นถึงกลไกการทำงานโดยรวมของการสร้างเส้นทางสำรองทั้งสองแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเป็นการสร้างเส้นทางสำรองแบบป้องกันหรือบูรณะก็ย่อมมีความเกี่ยวข้องกับความจุที่วางในโครงข่ายทั้งสิ้น ดังที่พบได้จากงานวิจัย [6]-[7] ซึ่งได้เปรียบเทียบให้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากความจุใช้งานและความจุสำรองที่วางลงไปในแง่ของการลดค่าใช้จ่ายและการเพิ่มค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำสำหรับการป้องกัน เปรียบเทียบกับการบูรณะ [7] และเปรียบเทียบระหว่างการบูรณะวิธีต่างๆ [5], [6] เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์และมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัย [8] ได้ปรับปรุงการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงให้เหมาะกับการนำไปใช้ด้วยการแบ่งโครงข่ายเป็นโครงข่ายย่อยซึ่งแสดงถึงเซตของโนดและข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกับการบูรณะหากมีความเสียหายเกิดขึ้น โดยอาศัยการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดและการหาการไหลที่มากที่สุด [9] ในการกำหนดเส้นทางบูรณะ [10] ซึ่งวิธีนี้อาจทำให้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่อยู่โดยรอบความเสียหายถูกใช้จนเต็ม ส่งผลให้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้มีความเปราะบาง (Vulnerability) อาจเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าปกติ ส่วนในงานวิจัย [11] และ [12] ได้ออกแบบการสร้างเส้นทางบูรณะจากการพิจารณาความจุสำรองของแต่ละเส้นทางที่ได้เตรียมไว้ด้วยวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแตกต่างจากงานวิจัย [13] และ [14] ที่จะกำหนดขีดแบ่ง (Threshold) ของเส้นทางบูรณะในการจองความจุสำรองก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกไปยังเส้นทางดังกล่าว วิธีบูรณะในงานวิจัย [15] เป็นการออกแบบการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบผสมคือใช้คูนอดที่อยู่ถัดจากความเสียหายไปหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ (Hop) เป็นคูนอดที่เชื่อมต่อเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นหรือในอีกมุมมองหนึ่งเป็นการกระจาย ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบออกจากจุดเสียหายนั่นเอง ซึ่งสามารถลดการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงบริเวณโดยรอบความเสียหายลงได้และยังลดโอกาสที่จะทำให้เกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ความจุสำรองจนหมดได้อีกด้วย

จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าในด้านของการวางความจุใช้งานและความจุสำรองของโครงข่ายพบว่าในการออกแบบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับการสร้างเส้นทางสำรองโดยตรงนั่นคือค่าใช้จ่ายในการออกแบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างเส้นทางสำรองด้วย ดังเช่นในงานวิจัย [16] และ [17] ที่ได้ออกแบบการวางความจุสำรองโดยกำหนดเส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด แต่ในงานวิจัย [18], [19] พบว่าการวางความจุด้วยวิธีดังกล่าวไม่

สามารถทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่ำที่สุดได้ จึงได้เสนอการวางความจุใช้งานและความจุสำรองไปพร้อมกันโดยในการวางความจุสำรองนั้นมีจุดมุ่งหมายคือต้องการให้เกิดการใช้ความจุสำรองร่วมกันหรือการเพิ่มค่าใช้จ่ายความจุสำรองของสายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ [20] ของแต่ละรูปแบบความเสียหายให้มากที่สุดโดยการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ให้มากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรอง ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลดังกล่าวอย่างชัดเจนในงานวิจัย [2], [21] โดยการกระจายโหลดที่กล่าวถึงนี้จะแตกต่างจากการทำให้โหลดสมดุล (Load balancing) ในงานวิจัย [22]-[23] ที่จะทำการออกแบบและปรับเปลี่ยนทั้งเส้นทางใช้งาน (Working path) และเส้นทางสำรอง (Backup path) เพื่อจุดประสงค์หลายประการเช่น รองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น (Increasing demand) สำหรับทราฟฟิกแบบพลวัต (Dynamic traffic) รับประกันการประวิงของแบนด์วิดท์ (Bandwidth-Delay Guarantees) โดยการออกแบบเส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองไปพร้อมกัน เป็นต้น

ความอยู่รอดของโครงข่ายดังกล่าวมานี้เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบโครงข่ายเป็นอย่างมากเพราะจะทำให้การบริการเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัย [1], [3], [4] ได้กล่าวถึงขอบเขตการนิยามความอยู่รอดของโครงข่าย รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นและแนวทางการยกระดับความอยู่รอดของโครงข่าย อีกทั้งได้เสนอแนวทางการแสดงความอยู่รอดของโครงข่ายโดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพด้วย งานวิจัย [2] ได้ขยายความให้ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยการแสดงถึงตัวอย่างของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้เป็นมาตรฐาน เช่น อัตราการบูรณะ ค่าความน่าเชื่อถือ ค่าสภาพพร้อมใช้งาน (Availability) [2] เป็นต้น ส่วนดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่มีการนิยามโดยเฉพาะและสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ดังเช่นในงานวิจัย [24], [25] และ [15] ได้นิยามดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในมุมมองต่างๆ เพื่อใช้ในการประเมินแบบจำลองที่งานวิจัยนั้นได้นำเสนอ เช่น ค่าความอยู่รอดของโครงข่ายสำหรับชั้นกายภาพ (Physical layer network survivability) สัดส่วนทราฟฟิกที่ไม่สามารถบูรณะได้ (Excess Loss due to Failure) ระดับผลกระทบที่อาจเกิดจากความเสียหาย (Degree of Disturbance) เป็นต้น จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการแสดงค่าความอยู่รอดของโครงข่ายจำเป็นต้องอาศัยดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับแบบจำลองและจุดประสงค์การแสดงผลของดัชนีชี้วัดด้วย

การกระจายโหลดที่กล่าวข้างต้นจึงน่าจะมีประโยชน์สำคัญในแง่ของการเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่ายในด้านการใช้ความจุสำรองให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดความเปราะบางที่อาจเกิดขึ้นกับโครงข่ายด้วย จากงานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีการบูรณะระดับสายเชื่อมโยงที่กล่าวข้างต้นไม่ได้พิจารณาถึงการกระจายโหลด ซึ่งเป็นประโยชน์สำคัญในด้านการออกแบบโครงข่าย ดังนั้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการบูรณะที่พิจารณาการกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบเหล่านี้ซึ่งแบ่งได้สามรูปแบบ

- วิธีการบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด (Load Weight Restoration scheme) จะกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของสายเชื่อมโยง (Link Utilization) ต่ำให้มากที่สุด
- วิธีการบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง (Spare capacity Weight Restoration scheme) วิธีนี้จะกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ (Available Spare capacity) ของแต่ละเส้นทาง
- วิธีการบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง (Load and spare capacity Weight Restoration scheme) วิธีนี้เป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีการข้างต้นเข้าด้วยกันคือการกระจายโหลดและการใช้ความจุสำรองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะกระจายทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของสายเชื่อมโยงต่ำที่สุดและสัดส่วนของทราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางนั้นก็จะเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ด้วย

สิ่งสำคัญอีกประการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจคือการออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อแสดงวัดความอยู่รอดของโครงข่าย ที่แสดงถึงการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของสายเชื่อมโยงต่ำของอัลกอริทึมหรือวิธีการที่ใช้ในการบูรณะ โดยคำนึงถึงค่าใช้งานของสายเชื่อมโยง (Link utilization) ภายหลังจากการเกิดความเสียหายเป็นส่วนสำคัญ

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบจำลองในการแก้ปัญหาการกระจายโหลดของการบูรณะระดับสายเชื่อมโยงแบบเดิม โดยได้เสนอการออกแบบเพื่อเลือกเส้นทางที่จะใช้ในการบูรณะจากค่าใช้งานสายเชื่อมโยงก่อนที่จะเกิดความเสียหาย ซึ่งให้โอกาสในการหาค่าการไหลที่มากที่สุดแก่เส้นทางที่มีค่าใช้งานสายเชื่อมโยงต่ำที่สุดก่อน เพื่อลดภาระการรับทราฟฟิกของสายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานสูงอยู่แล้ว ในกรณีที่ผลรวมค่าการไหลของทุกเส้นทางบูรณะมีค่ามากกว่าทราฟฟิกที่

ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย การกำหนดสัดส่วนของกราฟฟิคเหล่านี้ไปยังเส้นทางต่างๆ จะอาศัยการหาค่าผลรวมของกำลังสองของผลต่างที่น้อยที่สุดระหว่างสัดส่วนกราฟฟิคที่จะกำหนดไปยังเส้นทางเหล่านี้และความน่าจะเป็นที่จะเลือกเส้นทาง โดยใช้วิธีแบบวนซ้ำ (Iterative) เพื่อหาผลเฉลยของการกำหนดกราฟฟิค สำหรับแต่ละรอบของการคำนวณจะหาผลที่ดีที่สุดในการกำหนดเส้นทางและนำผลในรอบนี้ไปใช้ในรอบถัดไปจนกว่าจะครบจำนวนกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งผลเฉลยสุดท้ายที่ได้มานั้นจะทำให้ค่าการกระจายโหลดของวิธีที่นำเสนอดีกว่าการบูรณะแบบหาเส้นทางสั้นที่สุด โดยใช้ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่นำเสนอเพื่อประเมินการกระจายโหลดหรือกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของกระบวนการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง เพื่อแสดงค่าความอยู่รอดของโครงข่ายในกรณีที่มีความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อเพิ่มค่าความอยู่รอดของโครงข่ายโดยคำนึงถึงการกระจายโหลดของการบูรณะกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งจะปรับปรุงการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงเพื่อให้สามารถกระจายกราฟฟิคดังกล่าวไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ และยังพิจารณาถึงสัดส่วนของกราฟฟิคที่จะกำหนดไปก็ขึ้นอยู่กับค่าการไหลของแต่ละเส้นทาง ทำให้วิธีที่นำเสนอนี้สามารถลดโอกาสการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงจนหมด และนำหลักการกระจายโหลดนี้มาใช้ในการออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการแสดงถึงค่าความอยู่รอดของโครงข่าย

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงเพื่อแก้ปัญหาการกระจายโหลดด้วยวิธีการต่างๆ และออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการแสดงค่าความอยู่รอดของโครงข่ายในชั้นตรรกะโดยมีข้อกำหนดว่าจะไม่มีข่ายเชื่อมโยงใดเกิดความเสียหายในเวลาเดียวกัน การออกแบบนั้นคำนึงถึงการประสิทธิภาพของการบูรณะด้านการกระจายโหลดซึ่งก็คือกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย เมื่อกำหนดให้โครงข่ายมีความจุในหน่วยช่องสัญญาณและแยกกันระหว่างความจุใช้งานและความจุสำรอง แล้วนำการบูรณะที่ออกแบบมาเปรียบเทียบกับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบมาตรฐานหรือแบบเลือกใช้เส้นทางสั้นที่สุดโดยการหาค่าการไหลที่มากที่สุด โดยจะประเมินประสิทธิภาพของวิธีการบูรณะดังกล่าวในด้านของ

การกระจายไหลดโดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอ รวมทั้งอัตราการบูรณะและการใช้ประโยชน์จากความจุสำรอง หรือด้านอื่นๆ ที่เหมาะสม

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยการนิยามความอยู่รอดของโครงข่าย การพัฒนาดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ การสร้างเส้นทางสำรอง การของความจุสำรองสำหรับเส้นทางการบูรณะ ข้อดีและข้อเสียที่ได้รับจากการใช้วิธีการสร้างเส้นทางสำรองแบบต่างๆ แนวคิดกระจายไหลดรวมไปถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการกระจายไหลด
2. กำหนดปัญหาการวัดและการเพิ่มค่าความอยู่รอด แนวทางการพัฒนา และแบบจำลองในการแก้ปัญหา โดยคำนึงถึงประโยชน์ที่จะได้จากการพัฒนา
3. ออกแบบวิธีการบูรณะและดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ได้กำหนดแนวทางไว้
4. เขียนโปรแกรมจำลองและทดสอบวิธีที่ได้นำเสนอ โดยใช้โปรแกรมภาษา C
5. วิเคราะห์และประเมินผลที่ได้จากการจำลองวิธีที่นำเสนอเทียบกับวิธีมาตรฐาน ในด้านต่างๆ ทั้งการกระจายไหลด อัตราการบูรณะ การใช้ความจุสำรอง และด้านอื่นที่มีความเหมาะสม
6. สรุป วิจัยาณ์ ผลที่ได้และรวบรวมข้อมูลทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความอยู่รอดของโครงข่าย การออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อแสดงค่าความอยู่รอดของโครงข่าย และการสร้างเส้นทางสำรอง โดยเฉพาะวิธีการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง
2. แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบวิธีการบูรณะและดัชนีชี้วัดของงานวิจัยในอดีต
3. นำผลการพัฒนาที่ได้ไปประยุกต์กับการใช้งานจริงสำหรับโครงข่ายที่มีใช้ในปัจจุบัน และอนาคต รวมทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

1.7 ประมวลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ เป้าหมาย และขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วย การนิยามและหลักการวัดค่า ความอยู่รอดของโครงข่าย วิธีการสร้างเส้นทางสำรองแบบต่างๆ รวมถึงการเปรียบเทียบ ข้อดีข้อเสีย การกระจายโหลด และแนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 การออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพและวิธีการบูรณะที่นำเสนอ

กล่าวถึงแบบจำลองโครงข่าย การบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงที่นำเสนอ โดยแบ่งเป็นสอง ส่วนคือ ส่วนสร้างเส้นทาง และส่วนกำหนดกราฟฟิก และตัวอย่างการกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะ การคำนวณค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพโดยคำนึงถึงการกระจายโหลด

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากวิธีบูรณะที่นำเสนอ โดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ ออกแบบและดัชนีชี้วัดตัวอื่นที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับวิธีบูรณะมาตรฐาน

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยในส่วนแรกนั้นจะกล่าวถึงหลักการวัดความอยู่รอดของโครงข่ายที่ใช้เป็นพื้นฐาน ส่วนถัดมาจะกล่าวถึงวิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่ายที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับรองรับรูปแบบความเสียหายแบบหนึ่งข้างเชื่อมโยง จากนั้นจะกล่าวถึงประโยชน์ของการกระจายโหลดซึ่งเป็นแนวทางสำคัญที่ใช้พัฒนาในวิทยานิพนธ์และขอบเขตในการนิยามดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการบอกถึงประสิทธิภาพของการเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่าย โดยจะยกตัวอย่างดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของงานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนสุดท้ายนั้นจะกล่าวถึงแนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

2.1 คำจำกัดความ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้การเชื่อมต่อระหว่างโหนดใดๆเป็นระดับชั้นตรรกะ (Logical layer) สำหรับโครงข่ายแบบเมช (Mesh network) ซึ่งข่ายเชื่อมโยง (Link) คือช่องทางสื่อสารระหว่างโหนด และเส้นทาง (Path) คือเซตของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกันจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางของโหนดสื่อสารหรือโหนดที่พิจารณา โครงข่าย (Network) ที่นำมาใช้ในการอธิบายและทดสอบนั้น จะพิจารณาความจุ (Capacity) ของข่ายเชื่อมโยงเป็นจำนวนช่องสัญญาณ (Channel) โดยได้แบ่งช่องสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายออกเป็นสองส่วนคือ ความจุใช้งาน (Working Capacity) และความจุสำรอง (Spare Capacity)

2.2 ความอยู่รอดของโครงข่าย

ความอยู่รอดของโครงข่าย (Network Survivability) [1], [2] คือความสามารถของโครงข่ายที่จะป้องกันและปกป้องตนเองให้สามารถใช้งานได้ภายใต้สภาวะความเสียหายหลายระดับ โครงข่ายที่ดีนั้นต้องได้รับการออกแบบให้มีความจุสำรองที่มีปริมาณมากเพียงพอที่จะจัดการกับรูปแบบความเสียหายที่คาดการณ์ไว้ได้อย่างเหมาะสมและทำให้ผลกระทบที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นน้อยที่สุด ค่าความอยู่รอดของโครงข่ายสามารถแสดงได้ในรูปของ ค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย (Restorability) หรืออัตราการบูรณะ (Restoration ratio) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้เป็นมาตรฐานสำคัญสำหรับการบูรณะ ในขอบเขตของความอยู่รอดของโครงข่าย

ตามที่นิยามไว้ในงานวิจัย [1] สามารถแบ่งชั้น (Layer) เพื่อกำหนดเทคนิคของความอยู่รอดได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นเพื่อกำหนดเทคนิคของความอยู่รอด [1],[4]

ชั้น (Layer)	ส่วนประกอบ (Components)	เทคนิคของความอยู่รอด (Survivability Technique)
บริการ (Service)	โหนด เช่น สวิตช์ (Switch), จุดส่งสัญญาณ (Signaling points)	กำหนดขนาดของแพ็กเก็ต (Packet size limit)
	ข่ายเชื่อมโยง เช่น ทังก์ (Trunk), ข่ายเชื่อมโยงข้อมูล (Data links), ชุดข่ายเชื่อมโยงสัญญาณ (Signaling linksets)	การหาเส้นทาง (Routing) เช่น การหาเส้นทางแบบพลวัต (Dynamic Routing) การหาเส้นทางแบบสถิตย์ (Static Routing) การจัดรูปแบบใหม่ (Reconfiguration) เช่น Dual-homing
ตรรกะ (Logical)	โหนด เช่น อุปกรณ์ถ่ายโอน (MUXs, DCSs)	การบูรณะ (Restoration) เช่น การบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง (Link restoration)
	ข่ายเชื่อมโยง เช่น ช่องสัญญาณ (Channel)	การบูรณะระดับเส้นทาง (Path restoration)
ระบบ (System)	โหนด เช่น อุปกรณ์ถ่ายโอนเต็มอัตรา (Full-rate transmission equipment)	การป้องกัน (Protection) เช่น Self-healing rings, 1+1 diverse routing, p - Cycle
	ข่ายเชื่อมโยง เช่น เส้นใยแก้ว (Optical fiber), สายทองแดง (Metallic), คลื่นความถี่ (Frequency)	
กายภาพ (Physical)	โหนด เช่น ชุมสาย (Buildings),	การป้องกันความเสียหายทางกายภาพ
	ข่ายเชื่อมโยง เช่น สื่อส่งสัญญาณ (Media)	การป้องกันด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า การซ่อมบำรุง

2.2.1 รูปแบบการเกิดความเสียหาย

การวิเคราะห์ความอยู่รอดของโครงข่าย (Analysis of Survivability) สามารถพิจารณาตามรูปแบบการเกิดความเสียหายได้ดังนี้ [1],[4]

2.2.1.1 ระบุการเกิดความเสียหาย (Given occurrence of failure)

วิธีการนี้ได้มีการคาดการณ์ความเสียหาย และทำการระบุสัดส่วนของทราฟฟิก (Traffic) ที่ต้องได้รับการบูรณะหรือระดับความอยู่รอดที่ต้องการไว้ล่วงหน้า แล้วจึงทำการบูรณะให้ได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ วิธีการนี้จะง่ายต่อการประเมินค่าความอยู่รอดเนื่องจากจะกำหนดรูปแบบโดยมีขั้นตอนการประเมินค่าความอยู่รอดดังนี้

1. นิยาม “การวัดค่าความอยู่รอด”
2. เลือกแบบแผนการเกิดความเสียหาย (Failure scenario) ที่ต้องการประเมิน เช่น ความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single link failure) ความเสียหายแบบหนึ่งโหนด (single node failure)
3. พิจารณาและทำรายการรูปแบบความเสียหายทั้งหมด
4. คำนวณค่าความอยู่รอดของโครงข่ายที่ได้นิยามไว้

2.2.1.2 สุ่มการเกิดความเสียหาย (Random occurrence of failure)

วิธีการนี้จะพิจารณาว่าความเสียหายสามารถอธิบายได้ด้วย ตัวแปรสุ่ม (Random variable) จากการกำหนดฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function) ของความเสียหาย (Failure), อัตราการซ่อมหรือการบูรณะ เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่แสดงถึงคุณลักษณะต่างๆของโครงข่ายโดยมีขั้นตอนการประเมินค่าความอยู่รอดดังนี้

1. เก็บข้อมูลเหตุการณ์ความเสียหาย
2. นิยาม “การวัดค่าความอยู่รอด”
3. กำหนดเซตของเหตุการณ์ (Event) และเก็บรูปแบบความเสียหายทั้งหมด
4. หาค่าความอยู่รอดสำหรับแต่ละเหตุการณ์
5. หาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดแต่ละเหตุการณ์
6. คำนวณค่าความอยู่รอดของโครงข่ายที่ได้นิยามไว้

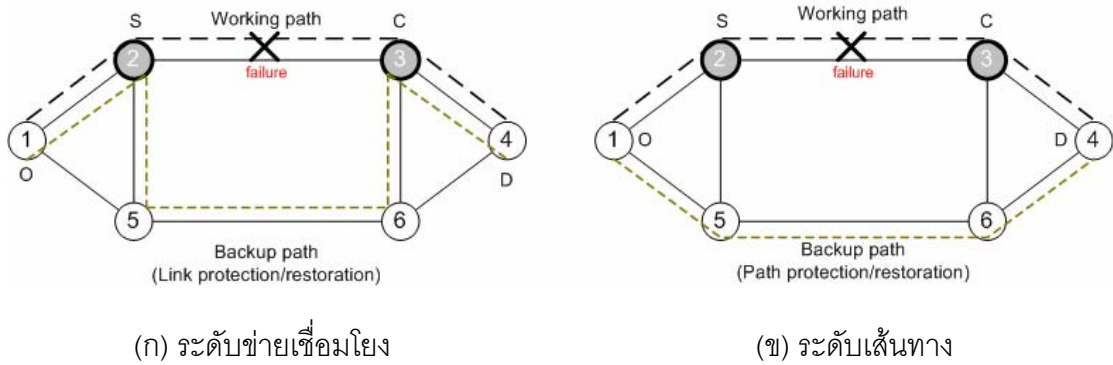
2.3 วิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงข่าย

เมื่อมีข่ายเชื่อมโยงถูกตัดขาดทำให้ทราฟฟิกที่อยู่บนข่ายเชื่อมโยงขาดการเชื่อมต่อ จึงจำเป็นต้องหาเส้นทางเดินให้กับทราฟฟิกเหล่านี้ใหม่ (Reroute) เพื่อไปใช้เส้นทางสำรอง (Backup path) ซึ่งสามารถสร้างได้หลายวิธีการ ดังตารางที่ 2.2 [2] โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือการป้องกันความเสียหาย (Protection) การบูรณะความเสียหาย (Restoration) และการบูรณะแบบวางแผน (Preplanned restoration)

ตารางที่ 2.2 วิธีการสร้างเส้นทางสำรอง

ชนิด	คำอธิบาย	ตัวอย่าง	ศัพท์บอกรวม
1	การป้องกันโดยแท้ (Pure Protection)	Link protection Path protection <i>p</i> -Cycle 1+1 APS	Protection
2	การบูรณะโดยแท้ (Pure Restoration)	Link restoration Path restoration Meta-mesh	Restoration
3	การบูรณะแบบกึ่งป้องกัน (Intermediate)	Distributed preplanning with Span Restoration (SR-DPP), ATM backup VP, Shared Backup Path Protection (SBPP)	Preplanned Restoration

จากตารางที่ 2.2 พบว่าทั้งการป้องกันโดยแท้ การบูรณะโดยแท้ และการบูรณะแบบกึ่งป้องกันสามารถแบ่งวิธีสร้างเส้นทางสำรองออกตามเกณฑ์ของตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อของทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย นั่นคือเส้นทางสำรองสามารถสร้างขึ้นได้ทั้งในระดับข่ายเชื่อมโยง (Link protection, Link restoration) ซึ่งทราฟฟิกจะถูกเชื่อมต่อบริเวณที่เกิดความเสียหาย และระดับเส้นทาง (Path protection, Path restoration) ซึ่งทราฟฟิกจะเชื่อมต่อบริเวณโหนดต้นทางและปลายทางดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การป้องกันและบูรณะความเสียหาย

2.3.1 ขั้นตอนการสร้างเส้นทางสำรอง

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการส่งสัญญาณ (Signaling) [4], [7] ในการสร้างเส้นทางสำรองโดยสรุปซึ่งจะยกตัวอย่างการสร้างเส้นทางบูรณะที่มีขั้นตอนการส่งสัญญาณที่ครอบคลุม การอธิบายการสร้างเส้นทางทั้งสามแบบในตารางที่ 2.2 สามารถแบ่งได้เป็นสามเฟสคือ เฟสกระจายข่าว (Broadcast phase) เฟสตอบรับ (Acknowledgement phase) และเฟสยืนยัน (Confirmation phase) โดยมีเส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองตามรูปที่ 2.1

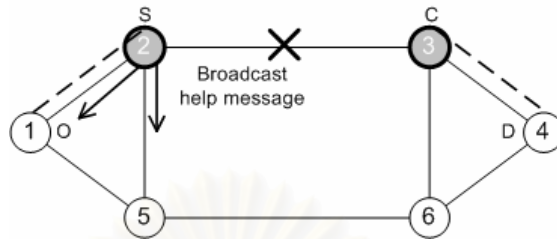
2.3.1.1 เฟสกระจายข่าว (Broadcast phase)

โหนดส่ง (Sender node) จะสร้างข่าวสารขอความช่วยเหลือ (Help message) ส่งไปยังโหนดที่อยู่โดยรอบ (Neighbor node) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลสำคัญในการบูรณะความเสียหายดังนี้

- หมายเลขโหนดต้นทางและปลายทาง
- หมายเลขโหนดที่อยู่ในเส้นทาง (Node ID)
- ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย (Loss traffic)
- ช่วงเชื่อมต่อ (Hop)
- ความจุสำรองที่ใช้งานได้ (Available spare capacity) ของเส้นทาง

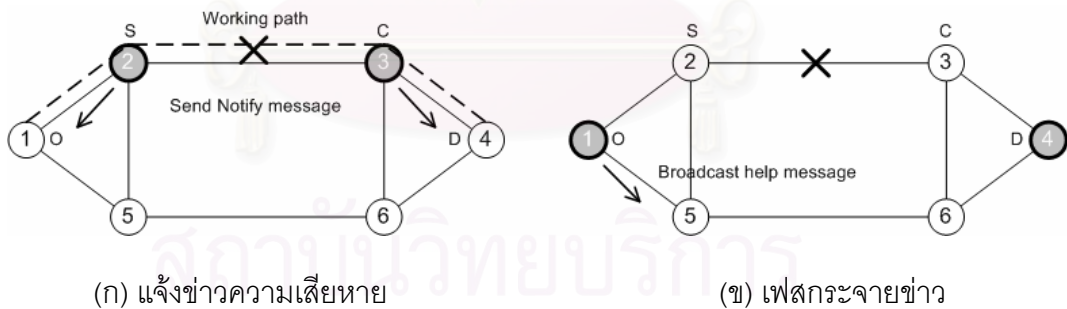
เมื่อโหนดตัวกลาง (Intermediate node) ได้รับข่าวสารขอความช่วยเหลือก็จะปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ หมายเลขของโหนดตัวกลางจะถูกเพิ่มเข้าไปในข่าวสาร ค่าช่วงเชื่อมต่อจะถูกเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งทุกครั้งที่ข่าวสารเดินทางผ่านข่ายเชื่อมโยง และถ้าหากว่าค่าความจุสำรองที่ใช้งานได้ของข่ายเชื่อมโยงที่ข่าวสารเดินทางผ่านมาล่าสุดมีค่าน้อยกว่าของเส้นทางก็จะทำการปรับเปลี่ยน ถ้าหากว่าค่าช่วงเชื่อมต่อที่ได้ไม่เกินค่าจำกัดช่วงเชื่อมต่อ (Hop limit) โหนดตัวกลางก็จะส่งข่าวสาร

ต่อไปยังโหนดโดยรอบยกเว้นโหนดที่ถูกบันทึกในข่าวสารผ่านข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าความจุสำรองเหลือหรือไม่เป็นศูนย์ และการส่งข่าวสารก็จะกระทำต่อไปจนกระทั่งถึงโหนดรับ (Chooser node) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เฟสกระจายข่าวสำหรับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง

ส่วนการสร้างเส้นทางบูรณะในระดับเส้นทางนั้น เส้นทางสำรองจะถูกสร้างขึ้นระหว่างคู่โหนดที่เป็นต้นทาง (Source node) และโหนดปลายทาง (Destination node) ของเส้นทางใช้งานที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายนั้นคือการสร้างเส้นทางสำรองในลักษณะปลายทางถึงปลายทาง (End-To-End) โดยโหนดที่ตรวจจับความเสียหาย (Detecting node) ต้องแจ้งข่าว (Notify message) ดังรูปที่ 2.3 (ก) ไปยังโหนดต้นทางและปลายทางทุกคู่โหนดที่เส้นทางของตนได้รับผลกระทบจากความเสียหายให้ทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนที่จะแต่ละคู่โหนดจะส่งข่าวสารขอความช่วยเหลือดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



(ก) แจ้งข่าวความเสียหาย

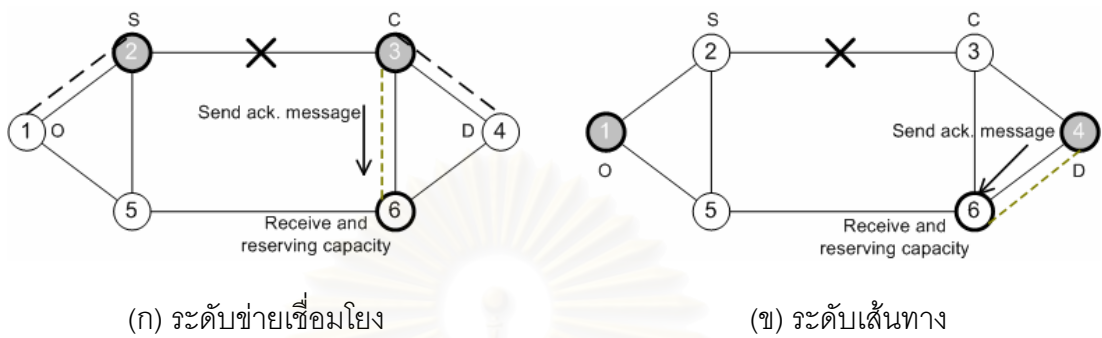
(ข) เฟสกระจายข่าว

รูปที่ 2.3 การแจ้งความเสียหายสำหรับการบูรณะระดับเส้นทาง

2.3.1.2 เฟสตอบรับ (Acknowledgement phase)

เมื่อโหนดรับได้รับข่าวสารขอความช่วยเหลือจึงเริ่มจองความจุสำรองโดยการส่งข่าวสารตอบรับ (Acknowledge message) กลับไปยังโหนดส่งตามเส้นทางกำหนดไว้ในข่าวสารขอความช่วยเหลือ เมื่อโหนดตัวกลางได้รับข่าวสารตอบรับก็จะจองความจุสำรองไว้และส่งต่อไปจนกระทั่ง

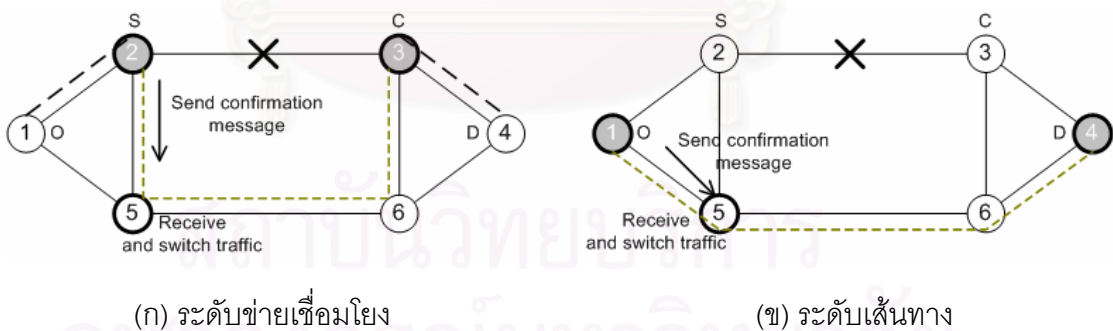
ข่าวสารตอบรับเดินทางไปถึงโหนดส่งดังแสดงในรูปที่ 2.4 หากว่าโหนดตัวกลางไม่สามารถจองความจุสำรองได้เนื่องจากมีความจุสำรองไม่เพียงพอก็จะส่งข่าวสารยกเลิก (Release message) กลับไปยังโหนดที่ส่งข่าวสารตอบรับมาก่อนหน้านี้เพื่อยกเลิกการจองความจุสำรอง



รูปที่ 2.4 เฟสตอบรับ

2.3.1.3 เฟสยืนยัน (Confirmation phase)

เมื่อโหนดส่งได้รับข่าวสารตอบรับจึงเตรียมการเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางสำรองโดยการส่งข่าวสารยืนยัน (Confirm message) ไปยังโหนดในเส้นทางสำรองเมื่อโหนดตัวกลางได้รับข่าวสารยืนยันจึงทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 เมื่อโหนดรับได้รับข่าวสารยืนยันจึงถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการบูรณะ



รูปที่ 2.5 เฟสยืนยัน

2.3.2 การป้องกันความเสียหาย [2], [4], [8]

ในการป้องกันความเสียหายทุกเส้นทางใช้งานจะมีการเตรียมเส้นทางสำรองและความจุสำรองไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะเกิดความเสียหายที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นเมื่อความเสียหายเกิดขึ้นเส้นทางที่เตรียมไว้จึงอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน (Ready-to-use state) โดยไม่มีการส่งสัญญาณเพื่อหาเส้นทางในเฟสกระจายข่าวและเฟสตอบรับเนื่องจากเส้นทางสำรองดังกล่าวได้เตรียมการไว้สำหรับความเสียหายเฉพาะรูปแบบโดยไม่ใช้ความจุสำรองร่วมกัน

2.3.2.1 การป้องกันความเสียหายในระดับเส้นทาง (Path protection)

ทุกเส้นทางใช้งานมีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ และมีการจองความจุสำรองไว้ล่วงหน้า แต่ไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันระหว่างเส้นทางสำรองเส้นต่างๆได้ การป้องกันความเสียหายวิธีนี้เรียกอีกอย่างว่าการป้องกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1+1 protection) วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถใช้เส้นทางสำรองได้ทันทีที่มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่มีข้อเสียคือต้องวางความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการบูรณะ

2.3.2.2 การป้องกันความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยง (Link protection)

วิธีการนี้มีการจองเส้นทางสำรองและจองความจุสำรองไว้สำหรับทุกข่ายเชื่อมโยง ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับ การป้องกันความเสียหายระดับเส้นทางแล้ว วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานความจุสำรองต่ำกว่าแต่ขาดความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทาง เนื่องจากต้องกำหนดเส้นทางสำรองเฉพาะสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในแง่ของการใช้งานความจุสำรอง

2.3.3 การบูรณะความเสียหาย [2], [4]

วิธีการบูรณะความเสียหายจะไม่มีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า ดังนั้นเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น โครงข่ายจะทำการหาเส้นทางที่มีความจุสำรองว่างอยู่ในขณะนั้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางสำรองเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ตามขั้นตอนการทำงานทั้งสามเฟสดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1 โดยวิธีการนี้สามารถใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันได้ ทำให้ลดการวางความจุสำรองลงได้

2.3.3.1 การบูรณะความเสียหายระดับเส้นทาง (Path restoration)

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นโหนดที่เชื่อมต่อกับความเสียหายจะแจ้งข่าวไปยังโหนดซึ่งเป็นโหนดต้นทางและโหนดปลายที่เส้นทางหลักเดินทางผ่านชายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหาย จากนั้นแต่ละโหนดสื่อสารก็จะทำการหาความจุสำรองที่ว่างอยู่ในขณะนั้นเพื่อสร้างเส้นทางสำรองดังแสดงขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 2.3 ถึง 2.5 จึงอาจเกิดการแย่งกันใช้ความจุสำรองของแต่ละโหนดสื่อสารได้ [13] อีกทั้งการสร้างเส้นทางสำรองด้วยวิธีนี้ใช้เวลานานและซับซ้อนจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานโดยตรง

2.3.3.2 การบูรณะความเสียหายระดับชายเชื่อมโยง (Link restoration)

เนื่องจากวิธีการนี้ไม่มีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า การสร้างเส้นทางสำรองนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อโหนดที่อยู่ติดกับชายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายสามารถตรวจจับ (Detect) ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ โหนดดังกล่าวจะทำการกระจายข้อมูล (Flooding) ไปทั่วโครงข่ายเพื่อหาชายเชื่อมโยงที่มีความจุสำรองว่างอยู่ หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายทั้งหมดไปยังเส้นทางสำรองที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งการบูรณะความเสียหายลักษณะนี้ไม่มีการแย่งกันใช้ความจุสำรอง เพราะการหาเส้นทางสำรองถูกทำโดยโหนดเพียงคู่เดียว

2.3.4 การบูรณะแบบวางแผน [2]

วิธีการนี้เป็นการผสมผสานระหว่างข้อดีของการสร้างเส้นทางสำรองของทั้งสองวิธีข้างต้นเข้าด้วยกันเรียกว่าการบูรณะแบบวางแผน (Preplanned restoration) [10] ซึ่งโครงข่ายมีการเตรียมเส้นทางสำรองก่อนเกิดความเสียหายแต่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อและจองความจุสำรองไว้ โดยการสร้างเส้นทางสำรองสามารถทำได้ทั้งระดับชายเชื่อมโยงและระดับเส้นทางเช่นกัน เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นโครงข่ายจะเสียเวลาในการตรวจจับความเสียหายและส่งข่าวสารเพื่อแจ้งความเสียหาย (Failure notification) ตามขั้นตอนในรูปที่ 2.2 2.4 และ 2.5 แต่จะแตกต่างตรงที่ข่าวสารที่ส่งนั้นจะผ่านไปยังเส้นทางสำรองที่เตรียมไว้แล้วเท่านั้น ทำให้การเชื่อมต่อทราฟฟิกทำได้เร็วกว่าวิธีการบูรณะโดยแท้ และวิธีนี้ยังได้ประโยชน์จากการใช้ความจุสำรองร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีป้องกันอีกด้วย

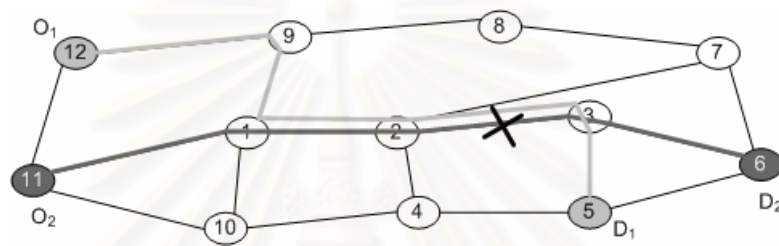
2.3.5 การเลือกใช้วิธีการสร้างเส้นทางสำรอง

หากแบ่งวิธีการสร้างเส้นทางสำรองตามเกณฑ์ของรูปแบบการใช้ความจุสำรอง ว่าความจุสำรองนั้นสามารถใช้ร่วมกันระหว่างรูปแบบความเสียหายหลายรูปแบบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นพร้อมกันหรือไม่ สำหรับวิธีการสร้างเส้นทางสำรองแบบบูรณะที่ไม่ได้มีการจองความจุสำรองไว้ความเสียหายที่เกิดขึ้นแต่ละรูปแบบสามารถใช้ความจุสำรองร่วมกันเพื่อเป็นการลดปริมาณความจุสำรองที่ต้องวางลงในโครงข่ายได้ [2], [20] จึงเป็นการลดต้นทุนซึ่งจะเห็นว่าการป้องกันความเสียหายนั้นไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการใช้ความจุสำรองร่วมกันได้

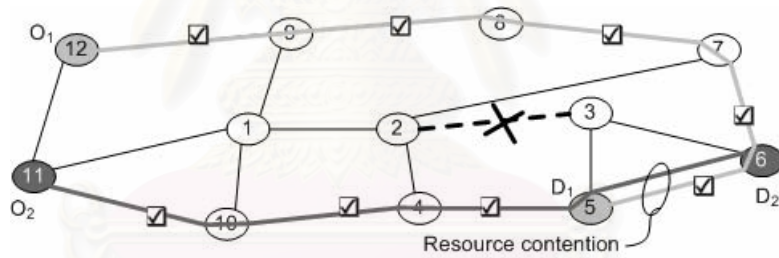
ถ้าเปรียบเทียบระหว่างวิธีป้องกันความเสียหายและการบูรณะความเสียหายในแง่มุมมองอื่น นอกเหนือจากการใช้ความจุสำรอง จะเห็นได้ชัดว่าข้อดีของการป้องกันความเสียหายคือ ช่วยลดความยุ่งยากของการสร้างเส้นทางสำรอง แต่ก็มีข้อเสียคือขาดความยืดหยุ่น (Flexibility) สำหรับความเสียหายในบางกรณีที่ไม่ได้มีการคาดการณ์ไว้ [9] เช่นเหตุการณ์ที่เส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองที่เตรียมไว้เกิดความเสียหายทั้งคู่ ในกรณีนี้โครงข่ายจะไม่มีความสามารถในการหาเส้นทางสำหรับรองรับการเชื่อมต่อนั้นได้อีก นอกจากนี้วิธีการป้องกันความเสียหายยังไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่ทราฟฟิกสามารถเปลี่ยนแปลงได้ (Dynamic traffic) หรือมีการปรับเปลี่ยนทอพอโลยี (Topology) ของโครงข่าย [11] อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีการบูรณะความเสียหายก็มีข้อเสียเช่นกันคือมีความยุ่งยากในกระบวนการสร้างเส้นทางสำรอง ดังนั้นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างทั้งสองวิธีเข้าด้วยกันนั้นคือการบูรณะแบบวางแผนซึ่งได้นำข้อดีของทั้งสองวิธีการสร้างเส้นทางสำรองมารวมเข้าไว้ด้วยกันคือมีความเร็วในการสร้างเส้นทางบูรณะและยังสามารถใช้ความจุสำรองได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

ส่วนการเลือกระหว่างการสร้างเส้นทางสำรองระดับข่ายเชื่อมโยงหรือระดับเส้นทางนั้นมีข้อดีข้อเสียต่างกันออกไป [9], [10] แต่จะเห็นได้ชัดว่าการสร้างเส้นทางสำรองระดับเส้นทางต้องใช้เวลาานเนื่องจากการเลือกเส้นทางเกิดจากทุกคู่โหนดสื่อสารในโครงข่าย อีกทั้งยังทำให้เกิดการแย่งชิงความจุสำรอง (Resource contention) ของแต่ละเส้นทางด้วย [2] ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.6 (ก) ความเสียหายเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยง (2, 3) เมื่อทำการบูรณะระดับเส้นทางดังรูปที่ 2.6 (ข) เห็นได้ว่าอาจเกิดการแย่งกันใช้ความจุสำรองระหว่างทั้งสองคู่โหนดสื่อสารในข่ายเชื่อมโยง (5, 6) ในด้านของการสร้างเส้นทางสำรองระดับข่ายเชื่อมโยงนั้นการแย่งชิงความจุสำรองมีน้อยกว่าเนื่องจากการหาเส้นทางทำโดยคู่โหนด (2, 3) เพียงคู่เดียวโดยไม่แยกทราฟฟิกใช้งานว่าเป็นของคู่โหนดสื่อสารคู่ใดเช่นในรูปที่ 2.6 (ค) ทำให้การหาเส้นทางเป็นไปอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระดับเส้นทาง อีกทั้งหากใช้เป็นการบูรณะแบบวางแผนก็จะทำให้ประสิทธิภาพของการบูรณะดีขึ้นได้อย่างมาก แต่ปัญหาที่เกิดกับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงคือการกระจายโหลด (Load distribution) ไม่สามารถทำได้ดีเท่ากับการบูรณะระดับเส้นทาง ซึ่งจะทำให้การจัดสรรเส้นทางเดิน

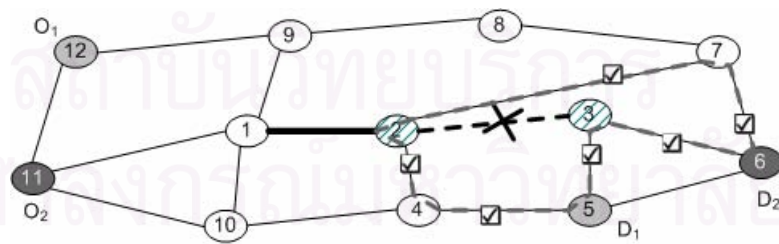
ของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของแต่ละคูโหนดสื่อสารใหม่ทั้งหมดดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.6 (ข) โดยมีสัญลักษณ์แสดงข่ายเชื่อมโยงที่ความจุสำรองถูกใช้ในการบูรณะ ทำให้โอกาสที่ทราฟฟิกเหล่านี้จะกระจายออกไปทั่วโครงข่ายมีมากกว่าการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) การใช้ความจุสำรองที่วางเอาไว้จึงมีมากกว่า จากการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีต่างๆ ที่กล่าวมาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาการบูรณะแบบวางแผนระดับข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากมีความรวดเร็วในการหาเส้นทางและไม่เกิดการแย่งกันใช้ความจุสำรอง โดยให้ความสนใจในการแก้ปัญหาการกระจายไหลของวิธีนี้ให้ดียิ่งขึ้น



(ก) เส้นทางใช้งานที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย



(ข) เส้นทางสำหรับการบูรณะระดับเส้นทาง



(ค) เส้นทางสำหรับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง

รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างการบูรณะระดับเส้นทางและข่ายเชื่อมโยง

2.3.6 การบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงโดยวิธีหาเส้นทางสั้นที่สุดและหาการไหลมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการนั้นก็ยังมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกที่จะพัฒนาการบูรณะความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยงแบบวางแผนซึ่งจากนี้ไปจะเรียกว่าการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบูรณะความเสียหายระดับเส้นทางแล้วการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงสามารถบูรณะความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการเลือกให้เส้นทางยังมีความยืดหยุ่นมากกว่าด้วย ดังนั้นในส่วนนี้จะยกตัวอย่างวิธีการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบที่หาเส้นทางสั้นที่สุด

ในงานวิจัย [7], [12] ได้นำเสนอวิธีการบูรณะความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยงโดยอาศัยการแบ่งโครงข่ายเป็นโครงข่ายย่อย (Subnetwork) ซึ่งแสดงถึงทรัพยากรหรือกลุ่มของโหนดและข่ายเชื่อมโยงที่มีความจุสำรองเพียงพอสำหรับการบูรณะความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการพิจารณาการไหลที่เป็นไปได้กับความจุสำรองที่มีในโครงข่าย ซึ่งพิจารณาจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อนคือให้เส้นทางที่สั้นที่สุดมีโอกาสสำหรับสำหรับหาการไหล (Flow) ที่เป็นไปได้ก่อน โดยใช้อัลกอริทึม Cumulative Maximum Feasible Flow on Spare resource เริ่มจากการไหลที่น้อยที่สุดก่อนจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มทรัพยากรที่ใช้ในการบูรณะในรอบถัดไป ค่าการไหลที่ได้ในแต่ละรอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับระดับการบูรณะที่ต้องการ เมื่อค่าการไหลเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการบูรณะ จึงเก็บค่าดังกล่าวไว้เป็นข้อมูลของโทโพโลยีสำหรับความเสียหายนั้นๆ เมื่อข่ายเชื่อมโยง l^* เสียหาย กำหนดให้

P_h^l เป็นชุดของเส้นทางสำรองที่มีความยาว h ช่วงการเชื่อมต่อ

f_p เป็นค่าการไหลของแต่ละเส้นทางสำรอง

F_H^l เป็นผลรวมค่าการไหลทั้งหมดของเส้นทางสำรองที่มีความยาว h ถึง H ช่วงเชื่อมต่อ

เมื่อใช้อัลกอริทึมการหาเส้นทางที่เป็นไปได้ค้นหาเส้นทางการบูรณะ จะได้ชุดของเส้นทางที่มีความยาว 2, 3, 4, ..., และ H ช่วงเชื่อมต่อคือ $(P_2^l, P_3^l, \dots, P_H^l)$ ซึ่งจะได้การไหลสะสมทั้งหมดดังนี้

$$F_H^l = \sum_{h=2}^H \sum_{p \in P_h^l} f_p \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการหาการไหลที่มากที่สุด

V	ชุดของโนด
E	ชุดของข่ายเชื่อมโยง
F_{req}^l	ระดับการบูรณะที่ต้องการ
P_h^l	ชุดของเส้นทางบูรณะที่มีความยาวช่วงเชื่อมต่อ h
$G_k = (V_k, E_k, S(E_k))$	ชุดข้อมูลของโครงข่ายที่ใช้เส้นทางบูรณะความยาวตั้งแต่ 2 ถึง k ช่วงเชื่อมต่อ
$V_k = \{v : v \in N(P_2^l, \dots, P_k^l)\}$	ชุดของโนดทั้งหมดของเส้นทางบูรณะความยาวตั้งแต่ 2 ถึง k ช่วงเชื่อมต่อ
$E_k = \{e : e \in A(P_2^l, \dots, P_k^l)\}$	ชุดของข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดของเส้นทางบูรณะความยาวตั้งแต่ 2 ถึง k ช่วงเชื่อมต่อ
$S(E_k) = \{s_e : e \in A(P_2^l, \dots, P_k^l)\}$	ชุดของความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยง e ของเส้นทางบูรณะความยาวตั้งแต่ 2 ถึง k ช่วงเชื่อมต่อ

ซึ่งสามารถหาช่วงการเชื่อมต่อที่น้อยที่สุดและเหมาะสมสำหรับระดับการบูรณะที่กำหนดไว้เมื่อมีข่ายเชื่อมโยง l^* เสียหายโดยอาศัย “Cumulative Maximum Feasible Flow on Spare Resource Algorithm” ซึ่งกระบวนการของอัลกอริทึมนี้สร้างขึ้นบนพื้นฐานของการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 ใช้อัลกอริทึม “Modified depth First Search” ในภาคผนวก ก เพื่อหาชุดของเส้นทาง $\{P_2^l, \dots, P_h^l\}$ เมื่อข่ายเชื่อมโยง l^* เสียหาย และกำหนดให้ $k = 2$
- ขั้นที่ 2 กำหนดชุด G_k, V_k, E_k และ $S(E_k)$ ดังที่แสดงในตารางที่ 1
- ขั้นที่ 3 สร้างโครงข่ายเป็นชั้น (Layered network) ระหว่างคูโนดที่เกิดความเสียหายสำหรับแต่ละชุดของเส้นทางที่มีความยาวเท่ากัน ซึ่งจะกำหนดให้เป็น s และ t และใช้อัลกอริทึม “MKM” [13] ในภาคผนวก ข เพื่อหาการไหลที่เกิดขึ้น F_k^l

For $\forall(e) \in E_k$
 If $s_e \neq 0$ then
 $e \in E_{k+1}$
 Else
 $e \notin E_{k+1}$

ขั้นที่ 5 If ($F_k^{l^*} < F_{req}^{l^*}$) then

$k = k + 1$
 ตรวจสอบความจุสำรองที่เหลือของแต่ละข่ายเชื่อมโยง
 ทำขั้นที่ 1

Else

$h_{l^*} = k$
 บันทึกค่า h_{l^*} ใน H

ขั้นที่ 6 จบการทำงาน

2.3.7 การคำนวณค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย [2]

ค่าความสามารถในการบูรณะหรือที่เรียกว่า อัตราการบูรณะ (Restoration ratio) เป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณกราฟฟิที่ที่สามารถบูรณะได้หลังเกิดความเสียหายต่อปริมาณกราฟฟิทั้งหมดที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย

อัตราการบูรณะสำหรับรูปแบบความเสียหาย x (R_x) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) โดยที่ T_x คือปริมาณกราฟฟิที่สามารถบูรณะได้เมื่อความเสียหาย x เกิดขึ้นและ W_x คือปริมาณกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย x

$$R_x = \frac{T_x}{W_x} \quad (2.2)$$

กำหนดให้ X เป็นเซตของรูปแบบความเสียหายทั้งหมดที่มีในโครงข่าย อัตราการบูรณะของโครงข่าย (R_N) คือค่าเฉลี่ยของอัตราการบูรณะความเสียหายทุกรูปแบบซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ (2.3)

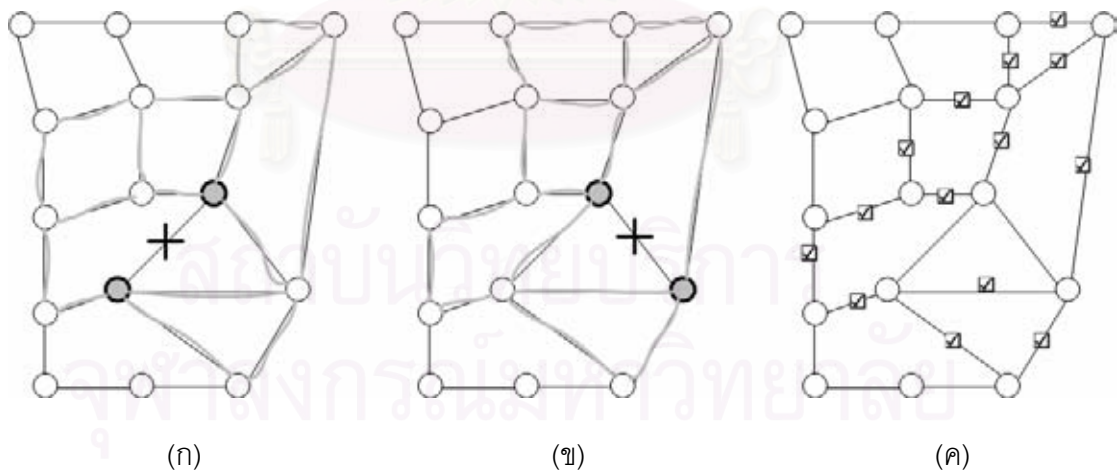
$$R_N = \sum_{x \in X} \left(\frac{T_x}{W_x} \right) = \frac{\sum_{x \in X} T_x}{\sum_{x \in X} W_x} = \frac{\sum_{x \in X} R_x \cdot W_x}{\sum_{x \in X} W_x} \quad (2.3)$$

2.4 การกระจายโหลด (Load distribution)

การกระจายโหลดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หมายถึงการกระจายกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยงไปยังเส้นทางบูรณะที่จัดไว้ โดยมีเป้าหมายคือการใช้ความจุสำรองที่ได้ออกแบบไว้ให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดและเป็นการใช้ความจุสำรองร่วมกัน (Spare capacity sharing) ระหว่างความเสียหายแต่ละกรณีให้มากที่สุด ซึ่ง

แตกต่างไปจากมุมมองในการทำโหลดให้สมดุล (Load balancing) ที่จะทำการออกแบบทั้งเส้นทางใช้งาน (Working path) และเส้นทางสำรอง (Backup path) เพื่อจุดประสงค์หลายประการเช่น รองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น (Increasing demand) สำหรับทราฟฟิกแบบพลวัต (Dynamic traffic) [24] รับประกันการประวิงของแบนด์วิดท์ (Bandwidth-Delay Guarantees) โดยการออกแบบเส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองไปพร้อมกัน [25] เป็นต้น

เมื่อพิจารณาในด้านการออกแบบการวางความจุ (Capacity Design) ซึ่งมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดการวางความจุให้มีค่าต่ำที่สุดโดยกำหนดให้มีอัตราการใช้ความจุไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการที่จะลดการวางความจุที่เกิดขึ้นได้นั้นการจัดสรรเส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองก็ต้องใช้ความจุที่ออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ดังเช่นเมื่อเปรียบเทียบการออกแบบเฉพาะความจุสำรอง [18], [19] กับการออกแบบทั้งการวางความจุใช้งานควบคู่กับการวางความจุสำรอง ซึ่งในงานวิจัยของ J. Doucette และ W.D. Grover [2], [11] เรียกการออกแบบดังที่กล่าวมานี้ว่า Spare Capacity Assignment (SCA) และ Joint Capacity Assignment (JCA) ตามลำดับ พบว่าการวางความจุวิธี JCA มีผลทำให้ความต้องการความจุสำรองลดลงถึง 20 % เมื่อเทียบกับวิธี SCA ซึ่งหมายความว่าความจุสำรองที่วางด้วยวิธี JCA ใช้ประโยชน์ได้คุ้มค่ามากกว่าวิธี SCA ทั้งนี้เพราะวิธี JCA กระจายการใช้งานทราฟฟิกไปทั่วโครงข่ายเมื่อความเสียหายเกิดขึ้นจึงไม่มีชายเชื่อมต่อใดที่ต้องรับภาระมากเกินไป ทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันสามารถใช้ความจุสำรองร่วมกันได้มากกว่าวิธี SCA



รูปที่ 2.7 การใช้ความจุสำรองร่วมกันสำหรับการบูรณะระดับชายเชื่อมต่อ [2]

วิธีที่สามารถกระจายทราฟฟิกได้คือ ลดปริมาณความจุสำรองในชายเชื่อมต่อทำให้เส้นทางที่ใช้ในการบูรณะยาวขึ้น การใช้ความจุสำรองในแต่ละชายเชื่อมต่อก็จะมีไม่มาก หรือ

พยายามใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำให้มากขึ้น ซึ่งการลดปริมาณความจุสำรองโดยตรงนั้นจะส่งผลต่อระดับการบูรณะอย่างแน่นอน แต่หากว่าเราใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำให้มากขึ้นโดยการกระจายทราฟฟิกสำหรับแต่ละรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันไปยังข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ก็จะสามารถลดการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงจนหมดการใช้ความจุสำรองร่วมกันก็จะมีมากขึ้น และถึงแม้ว่าการวางความจุสำรองจะลดลงแบบวิธี JCA แต่ก็ยังสามารถรับประกันอัตราการบูรณะที่ร้อยละ 100 ด้วย

ในด้านการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง เส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างคูโนดที่ตรวจจับความเสียหายมิได้หลายเส้นทางโดยจะมีความยาวช่วงเชื่อมต่อนตามค่าจำกัดช่วงเชื่อมต่อที่กำหนดไว้สามารถเรียกได้ว่าเป็นเซตของเส้นทาง หากใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางบูรณะก็มีโอกาสที่จะทำให้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่อยู่โดยรอบความเสียหายถูกใช้จนเต็ม ส่งผลให้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านั้นอยู่ในภาวะเปราะบาง (Vulnerable) อาจเกิดความเสียหายได้ง่าย และสำหรับโครงข่ายแบบแพ็กเกตก็ยังส่งผลให้ข่ายเชื่อมโยงนั้นเกิดความคับคั่ง (Congestion) มากขึ้นทำให้การส่งข้อมูลเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ในรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) แสดงความเสียหายสองรูปแบบและตัวอย่างของเส้นทางที่ใช้เป็นเส้นทางสำรองสำหรับบูรณะทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าถ้าหากมีการกระจายทราฟฟิกที่เหมาะสมก็จะเกิดการใช้ความจุสำรองร่วมกันสำหรับแต่ละรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายก็จะกระจายตัวไปยังข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ซึ่งสามารถลดความเปราะบาง (Vulnerability) และความเสี่ยงของการเกิดความเสียหายในลำดับถัดไปได้ ในรูปที่ 2.7 (ค) มีเครื่องหมายแสดงบนข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างความเสียหายแบบ (ก) และ (ข)

2.5 ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ (Performance index)

การออกแบบโครงข่ายตามแบบเดิมนั้นต้องการประสิทธิภาพดังที่ตั้งเป้าหมายไว้ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ โดยไม่พิจารณาถึงความอยู่รอดของโครงข่าย (Network survivability) จึงไม่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นจากการออกแบบด้วยวิธีข้างต้นได้ ประโยชน์สำคัญของการวางเป้าหมายความอยู่รอดของโครงข่ายคือ เมื่อเกิดความเสียหายประสิทธิภาพของโครงข่ายจะไม่ลดระดับลงมาจากที่กำหนดไว้ ดังนั้นการแสดงถึงปริมาณของความอยู่รอดจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ดังนั้นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของความอยู่รอดของโครงข่ายหรือประสิทธิภาพของการบูรณะ [3],[4] และสามารถทำได้ในหลายมุมมองทั้งในมุมมองของระดับการบูรณะ ปริมาณทราฟฟิกที่ไม่สามารถบูรณะได้ ระดับผลกระทบที่ได้รับจากความเสียหาย ค่าใช้งานความจุสำรอง (Spare capacity

utilization) โดยมีดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่สำคัญและใช้เป็นมาตรฐานสำคัญคือ อัตราการบูรณะ (Restoration ratio) ซึ่งได้อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อการคำนวณค่าความสามารถในการบูรณะ ความเสียหาย ค่าสภาพพร้อมใช้งาน (Availability) นอกจากนี้ยังอาจครอบคลุมไปถึงมุมมองในการกระจายโหลดได้อีกด้วย ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างดัชนีชี้วัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

2.5.1 ความอยู่รอดของโครงข่ายสำหรับชั้นกายภาพ (Physical layer network survivability)

H. Lee, S.B. Kim and Y. Go [5] ได้เสนอการประเมินค่าความอยู่รอดของโครงข่ายในชั้นกายภาพ (Physical layer) เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมและระบุถึงขีดจำกัดสำหรับความอยู่รอดของโครงข่ายในชั้นสูงขึ้นไปซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้ดังนี้

$G(V, E)$ คือกราฟที่แสดงถึงทอพอโลยีซึ่งมีเซตของโหนดเป็น V และเซตของขั้วเชื่อมโยงเป็น E

w_{ij} คือค่าความจุใช้งานของขั้วเชื่อมโยง (i, j)

s_{ij} คือค่าความจุสำรองของขั้วเชื่อมโยง (i, j)

f_{st} คือปริมาณทราฟฟิกที่มากที่สุดที่สามารถอยู่รอดได้จากความเสียหายของขั้วเชื่อมโยง (s, t)

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ขั้วเชื่อมโยง (s, t) ปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบมีค่าเป็น w_{st} ขั้นตอนแรกที่ต้องทำคือการหาการไหลที่มากที่สุด (Maximum flow) f_{st} ระหว่างโหนด s และ t ที่ใช้สำหรับการบูรณะจากนั้นจึงคำนวณค่า “physical survivability for demand pair (s, t) ” ดังสมการ (2.4) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนค่าที่น้อยที่สุดระหว่างค่าไหลและทราฟฟิกระหว่างโหนด s และ t เทียบกับทราฟฟิกที่เกิดความเสียหายในชั้นกายภาพ เพื่อให้เป็นค่าจำกัดสูงสุดในการปรับปรุงค่าความอยู่รอดต่อไป

$$p_{st} = \frac{\min(f_{st}, w_{st})}{w_{st}} \quad (2.4)$$

2.5.2 Excess loss due to failure

งานวิจัยนี้นำเสนอโดย A.Z. Fahad, P.A. Jayasumana และ A.H. Jahangir [6] เป็นการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพความอยู่รอดและสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย (Network survivability performance and availability evaluation) โดยอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็นเพื่อบอกถึงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายแบบหนึ่งขั้วเชื่อมโยง และได้

นำเสนอดัชนีชี้วัด “Excess loss due to failure ($ELF(e)$)” เพื่อแสดงถึงสัดส่วนของปริมาณกราฟฟิคบนข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้รับการบูรณะภายหลังการเกิดความเสียหาย ถ้ากำหนดให้ความเสียหายเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยง e ซึ่งมีกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายเป็นปริมาณ w_e และมีปริมาณกราฟฟิคที่ไม่สามารถบูรณะได้หลังจากเกิดความเสียหายเป็น n_e สามารถคำนวณค่า $ELF(e)$ ได้ดังสมการ (2.5)

$$ELF(e) = \frac{n_e}{w_e} \quad (2.5)$$

ถ้าหากว่าไม่มีเส้นทางที่จะรองรับกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายได้ค่า $ELF(e)$ จะมีค่าเป็น 1 แต่ถ้าสามารถบูรณะได้ทั้งหมดก็จะมีค่าเป็น 0 และนอกจากนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ยังได้เสนอแนวทางของงานที่ครอบคลุมไปถึงความเสียหายแบบหลายข่ายเชื่อมโยงและความเสียหายของโนดด้วย

2.5.3 Degree of Disturbance

C. Saivichit [7] ได้พัฒนาดัชนีชี้วัด “Degree of Disturbance (DoD)” เพื่อต้องการแสดงถึงปริมาณข้อมูลการสื่อสารของคู่โนดที่ถูกรบกวนจากความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหรือโนดใดๆ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่แสดงถึงปริมาณกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายที่พิจารณาเทียบกับปริมาณกราฟฟิคทั้งหมดในโครงข่ายดังแสดงในสมการ (2.6)

$$DoD(l^*) = \frac{\Omega^{l^*}}{\Omega_\pi} \quad (2.6)$$

สมการข้างต้นนี้แสดงกรณีการเกิดความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยที่ Ω^{l^*} คือปริมาณกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^* และ Ω_π คือปริมาณกราฟฟิคทั้งหมดในโครงข่าย โดยที่ค่า $DoD(l^*)$ ที่กล่าวถึงนี้สามารถเปรียบเทียบระหว่างทุกรูปแบบความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้ แต่จะไม่สามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงข่ายได้เนื่องจากปริมาณกราฟฟิคทั้งหมดของแต่ละโครงข่ายนั้นมีไม่เท่ากัน และจากงานวิจัยฉบับดังกล่าวเห็นได้ชัดว่าหากค่า $DoD(l^*)$ มากแสดงว่าปริมาณกราฟฟิคในโครงข่ายถูกรบกวนมาก ดังนั้นสำหรับความเสียหายทุกรูปแบบต้องการค่า $DoD(l^*)$ ที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2.5.4 การเลือกใช้งานดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ

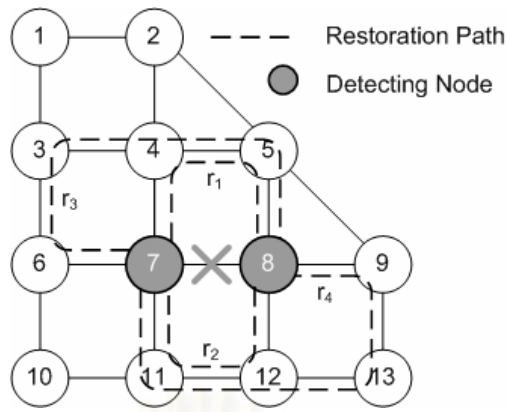
ในส่วนของการแสดงปริมาณความอยู่รอดนั้นต้องอาศัยค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเป็นสิ่งบ่งบอกซึ่งการนิยามนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าขอบเขตของการพิจารณาเป็นอย่างไร แนวทางการเลือก

เส้นทางบูรณะวิธีต่างๆ และสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะส่งผลถึงค่าของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพหรือไม่ นั้นก็ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการแสดงผล ดังที่แสดงไว้ข้างต้นเห็นได้ว่าการนิยามดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในอดีตจะมุ่งไปที่ระดับการบูรณะหรือสัดส่วนของปริมาณกราฟฟีกในรูปแบบต่างๆ ซึ่งใช้บอกถึงประสิทธิภาพของวิธีการบูรณะในมุมมองเดียวกับการนิยามค่าอัตราการบูรณะ เพียงแต่ปรับเปลี่ยนขึ้นในการพิจารณา หรือใช้รูปแบบกราฟฟีกที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้นจะเหมาะสมกับงานที่ผู้วิจัยได้ตั้งจุดประสงค์ไว้ เช่น Degree of Disturbance ที่ใช้บอกถึงสัดส่วนระหว่างกราฟฟีกใช้งานของข่ายเชื่อมโยงที่คาดว่าจะได้รับผลกระทบจากความเสียหายเทียบกับปริมาณกราฟฟีกใช้งานทั้งหมดของโครงข่าย ซึ่งไม่สามารถแสดงถึงความสามารถด้านการกระจายโหลดที่เหมาะสมได้ เนื่องจากพิจารณาเฉพาะปริมาณกราฟฟีกใช้งานก่อนเกิดความเสียหาย โดยไม่พิจารณาถึงความจุสำรองและกราฟฟีกใช้งานของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ทั้งก่อนและหลังการเกิดความเสียหาย ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แสดงถึงจุดประสงค์ด้านประสิทธิภาพการกระจายโหลดที่ควรเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของกราฟฟีกที่อยู่ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ส่วนดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่เหลือทั้งสองตัวนั้น เป็นการแสดงถึงสัดส่วนของปริมาณกราฟฟีกที่สามารถบูรณะได้ซึ่งคล้ายกับค่าอัตราการบูรณะ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้ค่าอัตราการบูรณะในการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการบูรณะด้วย

2.6 แนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

จากการศึกษาเรื่องความอยู่รอดของโครงข่ายในงานวิจัย [1]-[4] พบว่าเป็นการนิยามถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายในด้านต่างๆ ที่จะทำให้โครงข่ายสามารถใช้งานภายใต้ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ หากพิจารณาถึงความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยง สำหรับการบูรณะในระดับข่ายเชื่อมโยงนั้นกราฟฟีกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายจะถูกเชื่อมต่อไปยังเส้นทางสำรองที่เชื่อมต่อระหว่างคูโนดที่ตรวจจับความเสียหาย โดยเส้นทางเหล่านี้จะอยู่บริเวณโดยรอบตำแหน่งของความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีแนวทางการตัดสินใจเลือกเส้นทางได้แก่

- เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) เพื่อลดค่าใช้จ่าย
- เส้นทางที่มีการใช้งานน้อย หรือค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำเพื่อทำให้การใช้ความจุมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- ความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ (Available spare capacity) ในแต่ละเส้นทาง
- สามารถบูรณะกราฟฟีกที่เสียหายได้ในปริมาณสูงที่สุด



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเส้นทางบูรณะสำหรับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง

ซึ่งแนวทางที่กล่าวมานี้มีผลอย่างมากต่อการใช้ความจุสำรองของโครงข่าย จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการนั้นก็ยังมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เมื่อเปรียบเทียบการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงกับวิธีการบูรณะความเสียหายระดับเส้นทางแล้วการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงสามารถบูรณะความเสียหายได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการเลือกใช้เส้นทางยังมีความยืดหยุ่นมากกว่าด้วย แต่การบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงจากงานวิจัยในอดีตนั้นพิจารณาเพียงแค่การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยไม่ได้พิจารณาถึงการกระจายโหลดที่เหมาะสมจากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาประโยชน์ของการกระจายโหลดเพื่อเพิ่มค่าใช้งานความจุสำรองที่มีค่าใช้งานต่ำและไม่ทำให้ข่ายเชื่อมโยงใดต้องรับภาระมากเกินไป ซึ่งช่วยลดความเปราะบาง (Vulnerability) ของโครงข่ายหรือลดโอกาสของการเกิดความเสียหายในลำดับถัดไป ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาค่าการใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายเพื่อหาค่าการไหลที่มากที่สุด (Maximum flow) และปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ในการกำหนดสัดส่วนของกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางบูรณะที่เตรียมไว้เพื่อเพิ่มค่าใช้งานของความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหายต่ำเพื่อทำให้เกิดการใช้ความจุสำรองร่วมกันให้มากที่สุด

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ขยายขอบเขตการนิยามค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อให้การใช้งานเกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น โดยดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอใช้เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพในการกระจายกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางสำรองของกระบวนการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบต่างๆ โดยคำนึงถึงค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง (Link utilization) ภายหลังจากเกิดความเสียหายเป็นส่วนสำคัญ

บทที่ 3

การออกแบบวิธีการบูรณะและดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอ

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสร้างเส้นทางสำรองเพื่อบูรณะความเสียหายในอดีตซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่ายที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษาประโยชน์ของกระจายโหลดทำให้เกิดแนวคิดที่จะขยายขอบเขตในการนิยามเพื่อให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น ซึ่งได้นำไปสู่แนวทางในการปรับปรุงการกระจายโหลดที่มีเป้าหมายคือการใช้ความจุสำรองที่ได้ออกแบบไว้ให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพหรือเป็นการใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างความเสียหายแต่ละกรณีให้มากที่สุดโดยการเพิ่มค่าใช้งานความจุสำรอง ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาการกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงด้วย โดยเน้นถึงการพิจารณาการใช้งานของข่ายเชื่อมโยง (Link Utilization) เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่จะใช้ในการบูรณะและทำให้การใช้ความจุสำรองมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วยการกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังแต่ละเส้นทางตามสัดส่วนค่าการไหลของแต่ละเส้นทางนั้น และในส่วนของกรออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่พิจารณาถึงหลักการกระจายโหลด จะนำมาใช้เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงภายหลังจากทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ได้รับความเสียหายเรียบร้อยแล้วว่าสามารถกระจายทราฟฟิกเหล่านี้ได้มากน้อยเท่าใด ซึ่งแตกต่างจากดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในอดีตที่จะมุ่งไปที่ระดับการบูรณะหรือสัดส่วนของปริมาณทราฟฟิกในรูปแบบต่างๆ

3.1 แบบจำลองโครงข่าย (Network model)

กำหนดให้ความจุใช้งานและความจุสำรองของโครงข่ายแยกกันและทราบค่าแล้วในหน่วยของสัญญาณ ส่วนความต้องการส่งทราฟฟิกระหว่างคูโหนดสื่อสารมีค่าคงที่และเส้นทางใช้งานที่เชื่อมต่อระหว่างคูโหนดเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) เพียงหนึ่งเส้นทาง เส้นทางสำรองที่จะใช้เป็นเส้นทางบูรณะจะกำหนดไว้ล่วงหน้าและเก็บเป็นข้อมูลไว้ที่โหนดที่เชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง i^* ใดๆ ที่อาจได้รับความเสียหาย เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นจึงส่งสัญญาณไปตามเส้นทางที่ระบุไว้เพื่อจองความจุสำรอง ต่อจากนั้นจึงเชื่อมต่อทราฟฟิกที่เสียหายไปยังเส้นทางบูรณะ โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

$G(V, E)$	กราฟแสดงทอพอโลยีและแสดงเซตของ $ V $ โหนดและ $ E $ ข่ายเชื่อมโยง
wc_l	ปริมาณความจุใช้งานที่ใช้งานได้สูงสุดของข่ายเชื่อมโยง l
sc_l	ปริมาณความจุสำรองที่ใช้งานได้สูงสุดของข่ายเชื่อมโยง l
H	ขีดจำกัดช่วงเชื่อมต่อ (Hop limit)
P_h^l	เซตของเส้นทาง p ทั้งหมดที่มีความยาว h ช่วงเชื่อมต่อ ที่เชื่อมระหว่างโหนดที่เชื่อมกับข่ายเชื่อมโยง l^*
$L_p^l = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในเส้นทาง p
$R^k = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$	เซตของเส้นทางบูรณะทั้งหมด k เส้นทาง
$L_{r,i}^l = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในเส้นทางบูรณะ r_i
$\rho_{wc,l}$	ความจุใช้งานที่ถูกใช้โดยทราฟฟิกใช้งาน (Working traffic) ของข่ายเชื่อมโยง l
$\rho_{sc,l}^l$	ความจุสำรองที่ถูกใช้โดยทราฟฟิกที่ถูกบูรณะ (Restored traffic) ของข่ายเชื่อมโยง l สำหรับความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^*
ρ_l^r	ความจุที่ถูกใช้งานโดยทราฟฟิกใช้งาน (Working traffic) และทราฟฟิกที่ได้รับการบูรณะ (Restored traffic)
$\gamma_{i,l}^l$	<ul style="list-style-type: none"> มีค่าเป็น 1 ถ้าเส้นทางบูรณะ r_i สำหรับความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^* ผ่านข่ายเชื่อมโยง l มีค่าเป็น 0 ถ้าไม่ผ่าน

3.2 การบูรณะแบบวางแผนที่นำเสนอ

ในส่วนนี้จะนำเสนอการบูรณะแบบวางแผนระดับข่ายเชื่อมโยงโดยมีเป้าหมายคือกระจายกราฟฟิกรที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายด้วยวิธีการต่างๆ สามรูปแบบ และเพื่อให้การคำนวณสามารถแสดงได้อย่างชัดเจนวิธีการสามรูปแบบนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอนย่อยคือ ส่วนสร้างเส้นทาง และส่วนกำหนดกราฟฟิก

- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด (Load Weight Restoration scheme) ซึ่งจะขอเรียกว่าวิธี LWR จะทำการกระจายกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำให้มากที่สุดก่อน ความจุสำรองที่เหลือจึงใช้สำหรับเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงอันดับสูงขึ้นไป
- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง (Spare capacity Weight Restoration scheme) ซึ่งจะขอเรียกว่าวิธี SWR วิธีนี้จะกำหนดสัดส่วนของกราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางขึ้นอยู่กับความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ของแต่ละเส้นทาง ซึ่งการทำงานในขั้นตอนนี้จะใช้งานได้ก็ต่อเมื่อ มีความจุสำรองที่ใช้งานได้มากกว่าปริมาณกราฟฟิกที่เสียหายเท่านั้น
- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง (Load and spare capacity Weight Restoration scheme) ซึ่งจะเรียกว่าวิธี LSWR วิธีนี้จะเป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีการข้างต้นเข้าด้วยกันคือการกระจายโหลดและการใช้ความจุสำรองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะกระจายกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำที่สุดและสัดส่วนของกราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางนั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ด้วย

3.2.1 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด (Load Weight Restoration scheme: LWR)

วิธีที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าเป็นการออกแบบที่อยู่ในกลุ่มของการบูรณะแบบวางแผน มีจุดประสงค์คือทำให้ค่ากราฟฟิกของโครงข่ายมีความสมดุลมากขึ้นจากการบูรณะกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการตัดสินใจเลือกเส้นทางบูรณะนั้นสามารถทำได้หลายแนวทาง นอกจากการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและสามารถบูรณะกราฟฟิกได้สูงสุดแล้ว การหาค่าการไหลที่มากที่สุด (Maximum Flow) จากการเลือกเส้นทางที่มีการใช้งานน้อยก่อนจะทำให้ปัญหาความคับคั่ง (Congestion) ของข่ายเชื่อมโยงลดลงได้ โดยวิธี LWR มีตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของวิธี LWR

B_p^*	ค่า Busy factor ของเส้นทาง p
P_{order}^*	เซตของเส้นทาง p_{order} ที่จัดเรียงตามลำดับของ ค่า Busy factor จากน้อยไปหามาก
$L_{order}^* = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในเส้นทาง p_{order}
F_R^l	ผลรวมค่าการไหลของเซตของเส้นทางบูรณะ R^l
$sc_{l, p_{order}-1}$	ความจุสำรองที่เหลือของข่ายเชื่อมโยง l จากการหาค่าการไหล (Flow) ของเส้นทาง P_{order}^* ที่ 1 ถึง $p_{order} - 1$
$f_{p_{order}}^l$	ค่าการไหลที่มากที่สุดของเส้นทาง p_{order}
$f_{r,i}^l$	ค่าการไหลที่มากที่สุดของเส้นทางบูรณะ r_i
Ω^*	ปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย
$\Omega_{r,i}^*$	ปริมาณกราฟฟิกที่ควรจะไปใช้เส้นทางบูรณะ r_i

3.2.1.1 ส่วนสร้างเส้นทาง

เริ่มต้นด้วยการหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ที่เชื่อมต่อระหว่างคูโนดที่ต่อกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งมีความยาว 2 ถึง H ช่วงเชื่อมต่อแล้วบันทึกไว้ที่เซต P_2^*, \dots, P_H^* ตามลำดับโดยอาศัยอัลกอริทึม “Modified Depth First Search” [7] ดังแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นจึงเริ่มต้นหาค่า Busy Factor ที่แสดงถึงค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายหรือก่อนทำการบูรณะของทุกเส้นทางที่บันทึกไว้ข้างต้น และสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.1)

$$B_p^* = \max_{\forall l \in L_p^*} \left(\frac{\rho_{wc,l}}{wc_l + sc_l} \right) \quad (3.1)$$

จากนั้นทำการจัดเรียงเส้นทางใหม่ตามลำดับของค่า Busy factor จากน้อยไปหามากแล้วทำการบันทึกเส้นทางที่จัดเรียงไว้ที่เซต P_{order}^* เพื่อให้ความสำคัญในการหาค่าการไหลแก่เส้นทางที่มีค่าใช้งานต่ำที่สุดก่อน เนื่องจากเส้นทางที่ได้รับโอกาสในการหาค่าการไหลก่อนนั้นมีโอกาสที่จะได้ใช้ความจุสำรองที่มีก่อน ความจุสำรองที่เหลือจากการใช้ในขั้นแรกจึงเป็นโอกาสของเส้นทางที่จะหาการไหลในขั้นตอนถัดไป ต่อไปจึงเริ่มการหาค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเส้นทาง p_{order} ($f_{p_{order}}^l$) แล้วทำการบันทึกเส้นทางที่สามารถหาค่าการไหลได้ ($f_{p_{order}}^l > 0$) เป็นเซตของเส้นทางบูรณะ (R^l) ซึ่งการไหลที่หาได้จากอัลกอริทึมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่น้อยที่สุดของปริมาณความจุ

สำรวจที่สามารถใช้งานได้ในข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ในเส้นทางบูรณะเดียวกันดังแสดงในสมการ (3.2)

ดังนั้นผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเซตของเส้นทางบูรณะสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.3)

และต้องคำนวณเพื่อหาการไหลทั้งหมด $|P_{order}^{I^*}|$ ครั้ง

$$f_{P_{order}}^{I^*} = \min_{\forall l \in L_{order}^{I^*}} (sc_{l, P_{order}-1}) ; sc_{l,0} = sc_l \quad (3.2)$$

$$F_R^{I^*} = \sum_{i=1}^k f_{r,i}^{I^*} \quad (3.3)$$

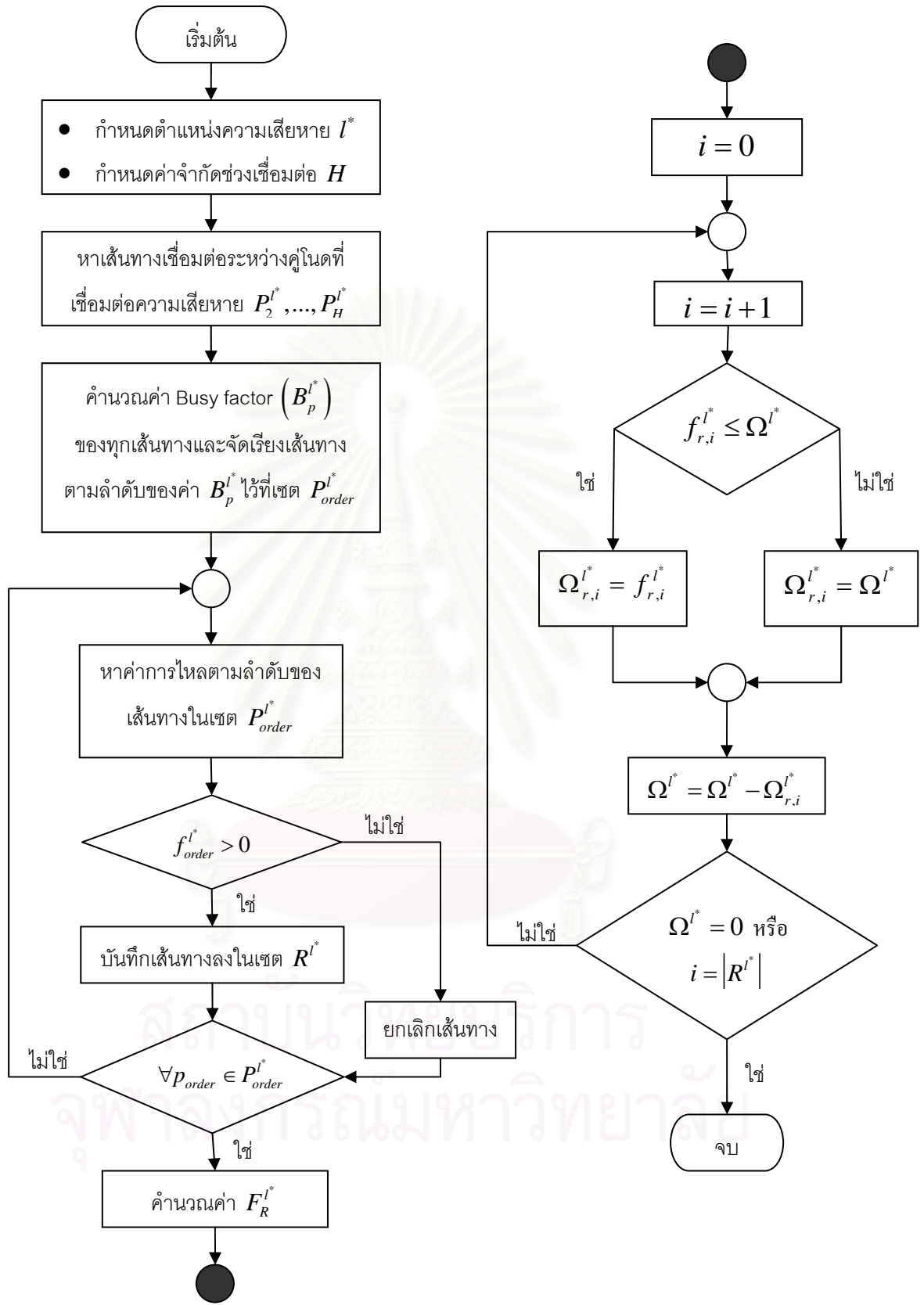
3.2.1.2 ส่วนกำหนดกราฟฟิก

เมื่อได้ค่าการไหลที่มากที่สุดของทุกเส้นทางบูรณะแล้ว จึงกำหนดค่าของกราฟฟิกตามลำดับของเส้นทางในเซต R^{I^*} ก่อนที่จะจะของความจุสำรวจในเส้นทางบูรณะดังนี้

สำหรับเส้นทางบูรณะ r_i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $|R^{I^*}|$

- ถ้า $f_{r,i}^{I^*} \leq \Omega^*$ จะได้ $\Omega_{r,i}^{I^*} = f_{r,i}^{I^*}$
 - ทำการปรับเปลี่ยนค่ากราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ภายหลังจากกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i
 - $\Omega^* = \Omega^* - \Omega_{r,i}^{I^*}$
- ถ้า $f_{r,i}^{I^*} > \Omega^*$ จะได้ $\Omega_{r,i}^{I^*} = \Omega^*$
 - ทำการปรับเปลี่ยนค่ากราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ภายหลังจากกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i
 - $\Omega^* = \Omega^* - \Omega_{r,i}^{I^*}$
- ตรวจสอบกราฟฟิกที่ยังไม่ได้รับการบูรณะ
 - ถ้า $\Omega^* = 0$ จบการทำงาน
 - ถ้า $\Omega^* \neq 0$ จงความจุสำรวจในเส้นทางถัดไป

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นถ้าปริมาณค่าการไหลที่มากที่สุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^{I^*} \geq \Omega^*$) จะได้อัตราการบูรณะร้อยละ 100 โดยส่วนกำหนดกราฟฟิกของวิธี LWR ที่กล่าวมาข้างต้นต้องวนรอบคำนวณเพื่อกำหนดกราฟฟิกเป็นจำนวนสูงสุด $|R^{I^*}|$ รอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังผังงานในรูปที่ 3.1



(ก) ส่วนสร้างเส้นทาง

(ข) ส่วนกำหนดทราฟฟิก

รูปที่ 3.1 การทำงานของวิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของไหล

3.2.2 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง (Spare capacity Weight Restoration scheme: SWR)

ในกรณีที่มีปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้มีเพียงพอหรือมากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย วิธีการนี้จะกำหนดปริมาณทราฟฟิกที่เชื่อมต่อไปยังเส้นทางบูรณะให้ขึ้นอยู่กับค่าการไหลของแต่ละเส้นทาง โดยลดความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของทราฟฟิกที่จะกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางและความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางให้มากที่สุด นอกจากนี้วิธีการ SWR ยังช่วยลดโอกาสการแย่งชิงความจุสำรองระหว่างเส้นทางบูรณะอีกด้วย โดยมีตัวแปรและพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ใช้ในสมการแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณวิธี SWR

f_p^l	ค่าการไหลที่มากที่สุดของเส้นทาง p
$w_{r,i}^l$	ค่าน้ำหนักของเส้นทางบูรณะ r_i
$Pr_{r,i}^l$	ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบูรณะ r_i (Path selection probability)
D^l	Square Euclidean distance

3.2.2.1 ส่วนสร้างเส้นทาง

กำหนดให้เกิดความเสียหายที่ชายเชื่อมयोग l^* ในส่วนการสร้างเส้นทางนั้นจะเริ่มจากหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เชื่อมต่อระหว่างคูโนดที่ต่อกับชายเชื่อมयोगที่เกิดความเสียหายซึ่งมีความยาว 2 ถึง H ช่วงเชื่อมต่อแล้วบันทึกไว้ที่เซต P_2^l, \dots, P_H^l ตามลำดับ โดยอาศัยอัลกอริทึม “Modified Depth First Search” [7] ต่อไปจึงเริ่มการหาค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเส้นทาง p (f_p^l) ตามลำดับความยาวเส้นทางของเซต P_h^l ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นโดยใช้อัลกอริทึม “MKM” [13] ดังที่แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งวิธีนี้ใช้การจัดเส้นทางที่มีความยาวเท่ากันให้เป็นโครงข่ายเป็นชั้น (Layered network) ด้วยวิธีการข้างต้นจึงส่งผลให้เส้นทางที่สั้นกว่าจะมีโอกาสในการใช้ความจุสำรองก่อน ความจุสำรองที่เหลือจึงจะเป็นโอกาสใช้งานของเส้นทางที่มีความยาวมากกว่า จากนั้นจึงทำการบันทึกเส้นทางที่สามารถหาค่าการไหลได้ ($f_p^l > 0$) เป็นเซตของเส้นทางบูรณะ (R^l) ซึ่งการไหลที่หาได้จากอัลกอริทึมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่น้อยที่สุดของปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ภายในชายเชื่อมयोगที่อยู่ในเส้นทางบูรณะเดียวกัน ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะทำงานคล้ายกับวิธี LWR จะแตกต่างก็เพียงว่าการหาค่าการไหลนั้นหาจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน

ดังนั้นผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเซตของเส้นทางบุงณะสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธี LWR ดังสมการ (3.3)

ลำดับถัดไปเราจะหาค่าน้ำหนักและความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบุงณะซึ่งใช้ค่าน้ำหนักในการคำนวณ เพื่อเตรียมการไว้สำหรับการกำหนดสัดส่วนของกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามปริมาณการไหลที่เป็นไปได้ โดยสามารถหาค่าน้ำหนักของเส้นทางได้ดังสมการ (3.4) และความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบุงณะนี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าน้ำหนักของเส้นทางบุงณะที่พิจารณาและผลรวมค่าน้ำหนักของเส้นทางบุงณะทั้งหมดในชุดที่พิจารณาตามสมการ (3.5)

$$w_{r,i}^* = f_{r,i}^{l^*} \quad (3.4)$$

$$\text{Pr}_{r,i}^* = \frac{w_{r,i}^*}{\sum_{i=1}^k w_{r,i}^*} \quad (3.5)$$

ส่วนเงื่อนไขบังคับคือปริมาณกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายสามารถบุงณะได้ทั้งหมดและสามารถเชื่อมต่อไปยังเส้นทางบุงณะได้ไม่เกินค่าการไหลที่มากที่สุดของแต่ละเส้นทาง นั่นคือปริมาณการไหลที่คำนวณได้จากสมการ (3.3) มีค่ามากกว่าปริมาณกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^{l^*} > \Omega^*$) ดังแสดงในสมการ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{l^*} = \Omega^{l^*} \quad (3.6)$$

$$\Omega_{r,i}^{l^*} \leq f_{r,i}^{l^*} \quad (3.7)$$

3.2.2.2 ส่วนกำหนดกราฟฟิ

ในส่วนการกำหนดกราฟฟินี้จะขอแนะนำถึงวิธีการกำหนดสัดส่วนของกราฟฟิที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามปริมาณการไหลที่เป็นไปได้ โดยอาศัยการคำนวณค่า Square Euclidean distance (D^l) ซึ่งแสดงถึงผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัดส่วนของการกำหนดกราฟฟิและค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบุงณะดังแสดงในสมการ (3.8) จุดประสงค์ของวิธีการนี้คือการทำให้ค่า Square Euclidean distance มีค่าน้อยที่สุดเพื่อทำให้การกำหนดกราฟฟิไปยังเส้นทางบุงณะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางมากที่สุด

$$D^l = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{l^*}}{\Omega^{l^*}} - \text{Pr}_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (3.8)$$

จากสมการ (3.8) จะเห็นได้ว่าวิธีการกำหนดสัดส่วนกราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะทั้งหมด k เส้นทางนั้นมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ และต้องทำการคำนวณวิธีการที่เป็นไปได้ออกมาทุกรูปแบบเพื่อเลือกรูปแบบที่ทำให้ค่า Square Euclidean distance มีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้การคำนวณซับซ้อนยิ่งขึ้น จึงได้นำวิธีการแก้ปัญหาที่เรียกว่าวิธีวนซ้ำ (Iterative) นำเสนอโดย A. Giorgetti, L. Valcarengi และ P. Casoldi [18] มาใช้ในการปรับปรุงวิธีการกำหนดสัดส่วนกราฟฟิกที่เหมาะสม ซึ่งวิธีวนซ้ำได้กำหนดให้จำนวนรอบที่ต้องทำการคำนวณมีค่าเท่ากับปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $N = \Omega^{l^*}$ เมื่อพิจารณาการคำนวณที่ n กราฟฟิก 1 ช่องสัญญาณจะถูกกำหนดไปยังเส้นทางบูรณะ จากนั้นจึงเลือกเส้นทางที่มีค่า D^{n,l^*} ที่น้อยที่สุดสำหรับรอบการคำนวณนั้นเพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป ดังนั้นการคำนวณค่า Square Euclidean distance ที่น้อยที่สุดจะเป็นไปตามสมการ (3.9)

ตารางที่ 3.4 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ในสมการ (3.9) ถึง (3.12)

$\mathbf{N} = \{1, \dots, n, \dots, N\}$	จำนวนรอบที่ต้องทำทั้งหมด
n	รอบของการคำนวณ
$\Omega_{r,i}^{n-1,l^*}$	สัดส่วนกราฟฟิกที่กำหนดไปยังเส้นทางบูรณะที่ i ตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ $n-1$
δ_j	ตัวแปรไบนารี (Binary Variable) มีค่าเป็น 1 เมื่อ $i = j$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ j เป็นค่าอื่นๆ
j	รูปแบบการกำหนดกราฟฟิกสำหรับรอบการคำนวณที่ n
$D_{i,j}^{n,l^*}$	ค่าผลต่างกำลังสองของการกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i รูปแบบการกำหนดกราฟฟิกที่ j สำหรับรอบการคำนวณที่ n
D^{n,l^*}	Square Euclidean Distance สำหรับรอบการคำนวณที่ n

$$D^{n,l^*} = \min_{j \in \{1, \dots, k\}} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{n-1,l^*} + \delta_j}{n} - \text{Pr}_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & ; i = j \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{n,i^*} = n \quad (3.11)$$

$$\Omega_{r,i}^{N,i^*} \leq f_{r,i}^{I^*} \quad (3.12)$$

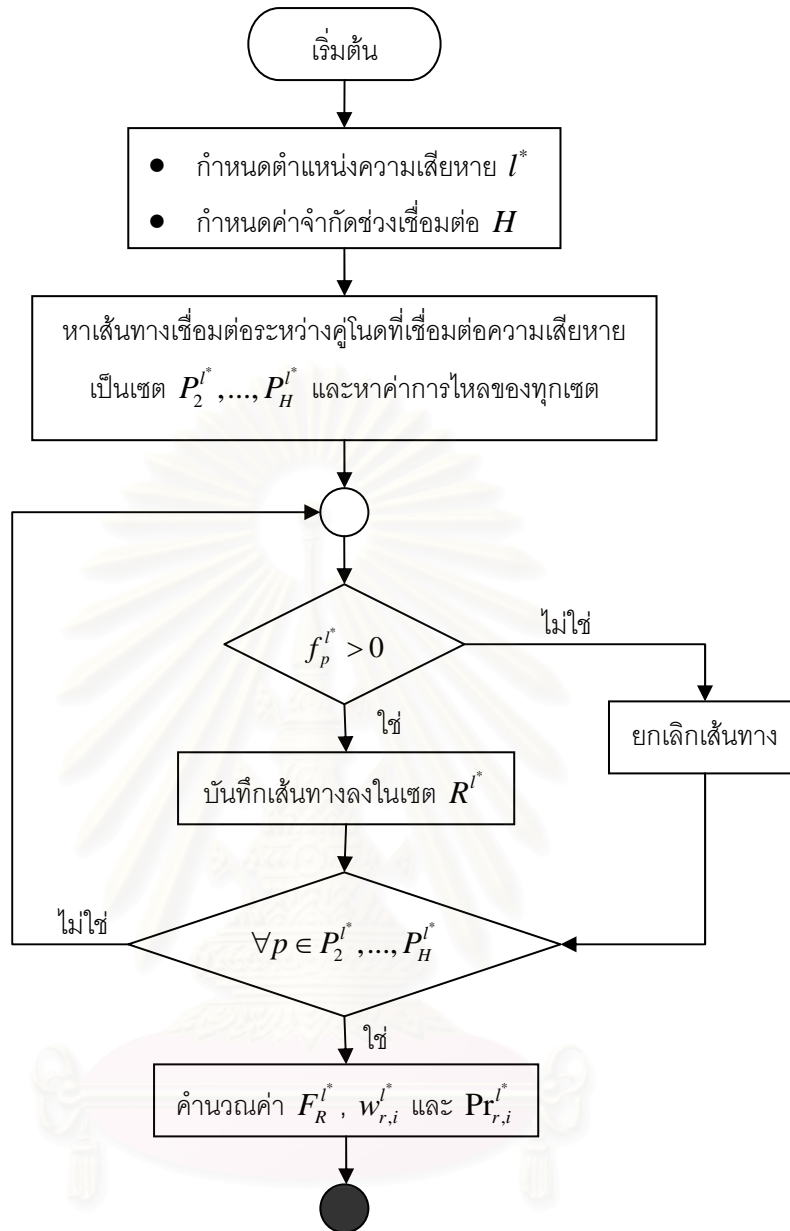
โดยสมการ (3.10) แสดงถึงเงื่อนไขของค่า δ_j ส่วน $\Omega_{r,i}^{n-1,i^*}$ นั้นคือสัดส่วนกราฟฟิกที่กำหนดไปยังเส้นทางบวระที่ i ตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ $n-1$ ซึ่งได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้า ดังนั้นเงื่อนไขบังคับในสมการ (3.6) และ (3.7) สามารถแก้ไขใหม่ได้ดังสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของทั้งสมการ (3.8) และสมการ (3.9) ซึ่งสามารถวัดได้จากจำนวนพจน์ของค่า D^{I^*} ที่คำนวณได้จากการกำหนดความจุที่เสียหายลงบนเส้นทางการบวระ โดยหากใช้สมการ (3.8) ต้องคำนวณ $\binom{\Omega^{I^*} + k - 1}{k - 1}$ ครั้ง ส่วนวิธีวนซ้ำในสมการ (3.9) ต้องคำนวณ $k \times \Omega^{I^*}$ ครั้ง ซึ่งจะเห็นว่าต้องคำนวณน้อยครั้งกว่าและง่ายกว่าวิธีแรก

ในกรณีที่ไม่สามารถบวระปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายได้ทั้งหมดเงื่อนไขบังคับในสมการ (3.6) และ (3.7) จะไม่เป็นจริง เนื่องจากปริมาณการไหลที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^{I^*} \leq \Omega^{I^*}$) ดังนั้นต้องปรับเปลี่ยนเงื่อนไขบังคับในสมการดังกล่าว และไม่ต้องคำนวณสัดส่วน กราฟฟิกในสมการ (3.9) และจะได้ปริมาณกราฟฟิกที่จะต้องกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางบวระดังแสดงในสมการ (3.13) และ (3.14) ตามลำดับ และการทำงานของขั้นตอนบวระสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.2 และ 3.3

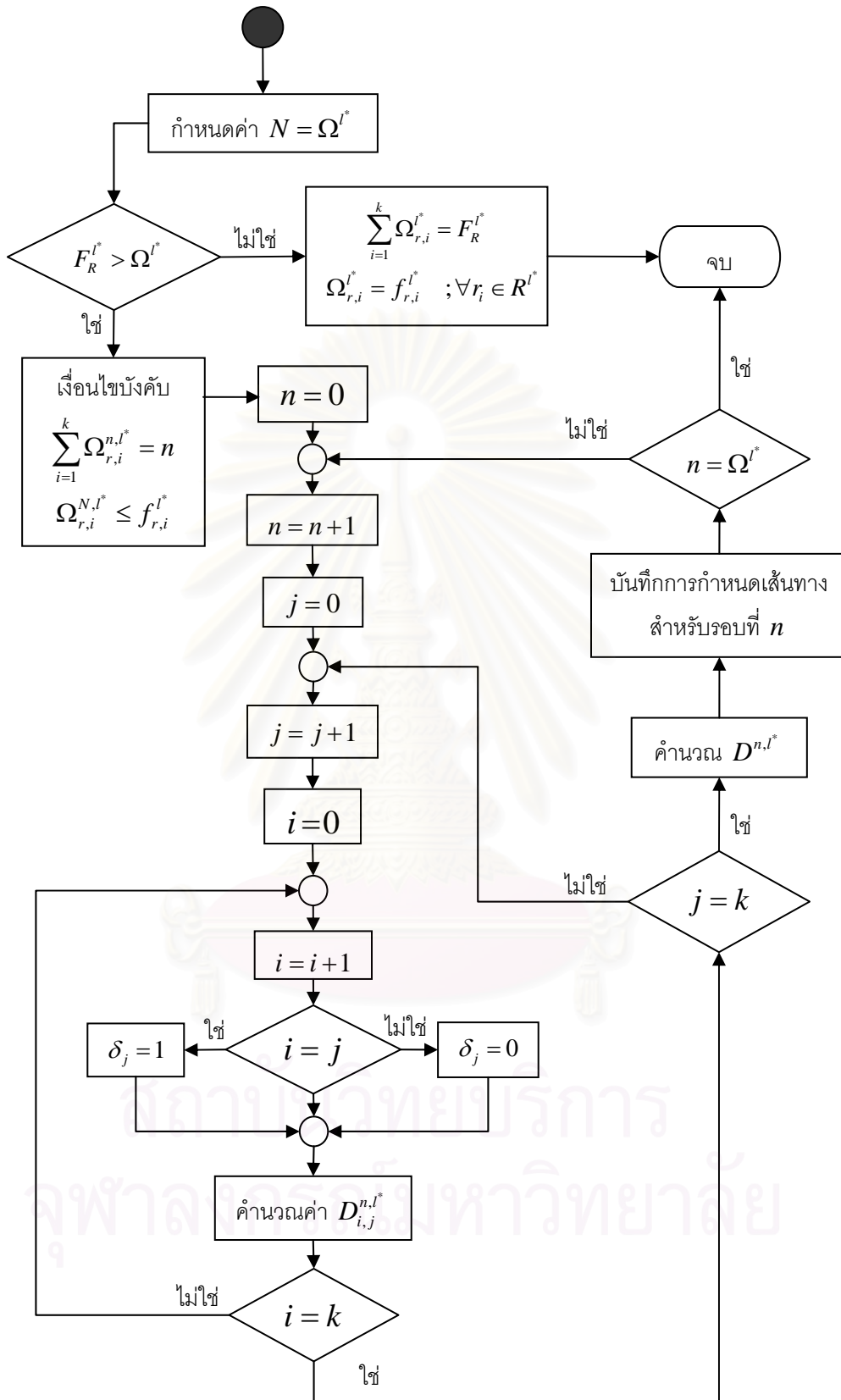
$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{I^*} = F_R^{I^*} \quad (3.13)$$

$$\Omega_{r,i}^{I^*} = f_{r,i}^{I^*} \quad ; \forall r_i \in R^{I^*} \quad (3.14)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนสร้างเส้นทาง



รูปที่ 3.3 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนกำหนดทราฟฟิก

3.2.3 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง (Load and Spare capacity Weight Restoration scheme: LSWR)

วิธีการบูรณะแบบผสมหรือ LSWR ที่นำเสนอนี้เกิดจากแนวความคิดของการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการบูรณะทั้งสองวิธีข้างต้น วิธี LWR สามารถทำให้โหลดหรือกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปใช้เส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำ แม้จะเป็นกรณีที่ผลรวมค่าการไหลที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^i \leq \Omega^i$) แต่ในกรณีที่มีความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ในแต่ละเส้นทางบูรณะเหลือเพียงพอหรือมีค่ามากกว่าปริมาณกราฟฟิกดังกล่าว ($F_R^i > \Omega^i$) วิธีการนี้จะไม่สามารถกำหนด กราฟฟิกให้เหมาะสมกับสัดส่วนค่าการไหลของแต่ละเส้นทางได้ ส่วนวิธี SWR จะมีปัญหาต่างจากวิธี LWR คือสามารถกระจายกราฟฟิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผลรวมค่าการไหลที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^i \leq \Omega^i$) เท่านั้น ดังนั้นการนำข้อดีของทั้งสองวิธีมารวมกันก็น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีบูรณะให้สามารถบรรลุเป้าหมายของทั้งสองวิธีข้างต้นได้พร้อมกัน

3.2.3.1 ส่วนสร้างเส้นทาง

ในส่วนสร้างเส้นทางของวิธี LSWR จะทำงานเหมือนกับส่วนสร้างเส้นทางของวิธี LWR เพียงแต่หลังจากการคำนวณผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ (F_R^i) ในสมการ (3.3) แล้วให้นำค่าการไหลของแต่ละเส้นทางบูรณะ ($f_{r,i}^i$) มาใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักของเส้นทาง ($w_{r,i}^i$) และความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทาง ($Pr_{r,i}^i$) ดังสมการ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เส้นทางบูรณะกระจายออกไปยังข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำมากกว่าการใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดของวิธี SWR ส่วนสร้างเส้นทางของวิธีนี้ต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าการไหลทั้งหมด $|P_{order}^i|$ ครั้ง เช่นเดียวกับวิธี LWR

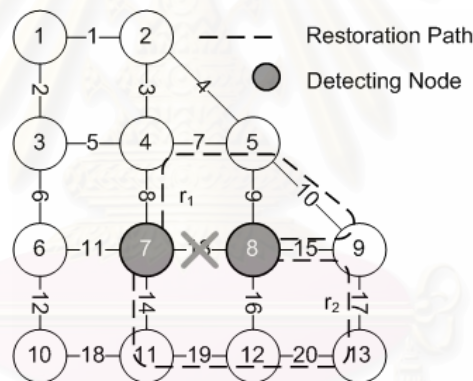
3.2.3.2 ส่วนกำหนดกราฟฟิก

หลังจากการสร้างเส้นทางในส่วนแรกแล้วจึงทำการกำหนดกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังเส้นทางบูรณะด้วยวิธีการเดียวกับการกำหนดกราฟฟิกของวิธี SWR แต่จะเกิดการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำ เนื่องจากการสร้างเส้นทางในขั้นแรกเราเลือกใช้เส้นทางจากการเรียงลำดับค่า Busy factor จากน้อยไปหามาก หากผลรวมค่าการไหลที่หาได้ในส่วนสร้างเส้นทางมีค่ามากกว่าปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^i > \Omega^i$)

วิธีการนี้ก็จะสามารถกำหนดสัดส่วนกราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะตามปริมาณค่าการไหลที่หาได้ โดยต้องคำนวณตามวิธีวนซ้ำเป็นจำนวน $k \times \Omega^*$ ครั้ง แต่ถ้าผลรวมค่าการไหลที่หาได้มีค่าน้อยกว่าปริมาณกราฟฟิกเหล่านั้น ($F_R^l \leq \Omega^*$) ก็จำเป็นจะต้องใช้ความจุสำรองของทุกเส้นทางให้เต็มทีซึ่งจะเป็นไปตามสมการ (3.13) และ (3.14)

3.2.4 ตัวอย่างการทำงานของวิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของไหลและความจุสำรอง

ในส่วนนี้จะขอยกตัวอย่างวิธี LSWR เพื่อทำความเข้าใจและเปรียบเทียบการหาค่า Square Euclidean Distance แบบสมการ (3.8) กับ สมการ (3.9) วิธีวนซ้ำ โดยกำหนดให้ใช้โครงข่ายทดสอบในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถบูรณะปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายได้ทั้งหมดนั้นคือปริมาณการไหลที่คำนวณได้ในขั้นตอนวางแผนมีค่ามากกว่าปริมาณกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^l > \Omega^*$) ตัวอย่างนี้แสดงกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 เสียหายและใช้เส้นทางบูรณะได้สองเส้นทางคือ r_1 และ r_2 โดยพารามิเตอร์ต่างๆของโครงข่ายมีค่าดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 โครงข่ายตัวอย่าง

- $wc_l = 10 \quad \forall l$
- $sc_8 = 9, sc_{10} = 9, sc_{17} = 8, sc_{19} = 3, sc_{20} = 7$
- $sc_l = 10 \quad \forall l \in E - \{8, 10, 17, 19, 20\}$
- $\rho_7 = 1, \rho_8 = 1, \rho_{13} = 2, \rho_{14} = 9, \rho_{15} = 3, \rho_{17} = 3$
- $\rho_l = 0 \quad \forall l \in E - \{7, 8, 13, 14, 15, 17\}$
- $\Omega^* = 2 ; l^* = 13$

- $R^I = \{r_1, r_2\}$

- $L_1^I = \{8, 7, 10, 15\}$, $L_2^I = \{14, 19, 20, 17, 15\}$

ขั้นตอนด้านล่างนี้แสดงวิธีการกำหนดกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของชายเชื่อมโยงที่ 13 ไปยังเส้นทางบูรณะที่กำหนดไว้

3.2.4.1 ส่วนสร้างเส้นทาง

1. จากพารามิเตอร์ที่แสดงข้างต้นสามารถคำนวณค่า Busy factor จากสมการ (3.5) ได้ดังต่อไปนี้

$$B_1^I = \max\left(\frac{1}{10+10}, \frac{1}{10+10}, \frac{0}{10+10}, \frac{3}{10+10}\right) = \frac{3}{20} = 0.15$$

$$B_2^I = \max\left(\frac{9}{10+10}, \frac{0}{10+10}, \frac{0}{10+10}, \frac{3}{10+10}, \frac{3}{10+10}\right) = \frac{9}{20} = 0.45$$

การคำนวณที่ได้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเส้นทางแรกนั้นมีค่า Busy factor ต่ำกว่านั่นคือเส้นทางที่ 1 จะได้รับโอกาสในการหาค่าการไหลก่อน ทำให้มีโอกาสที่จะได้ใช้ความจุสำรองที่มีก่อน ความจุสำรองที่เหลือจากการใช้ในขั้นแรกจึงเป็นโอกาสของเส้นทางที่ 2 ที่จะหาการไหลในขั้นตอนถัดไป

2. เส้นทางที่จัดเรียงตามลำดับของค่า Busy factor คือ $P_{order}^I = \{r_1, r_2\}$ และสามารถหาค่าการไหลของเส้นทาง r_1 จากสมการ (3.6) ได้ดังนี้

$$f_1^I = \min(9, 10, 9, 10) = 9$$

เมื่อหาค่าการไหลของเส้นทาง r_1 แล้วต้องปรับเปลี่ยนค่าความจุสำรองตามการใช้งานเพื่อใช้ในการคำนวณการไหลของเส้นทาง r_2 นั่นคือ

- $sc_{7,1} = 10 - 9 = 1$

- $sc_{8,1} = 9 - 9 = 0$

- $sc_{10,1} = 9 - 9 = 0$

- $sc_{15,1} = 10 - 9 = 1$

- $sc_{l,1} = sc_l$; $\forall l \in E - \{7, 8, 10, 15\}$

สามารถหาค่าการไหลของเส้นทาง r_2 จากสมการ (3.6) ได้ดังนี้

$$f_2^I = \min(10, 3, 7, 8, 1) = 1$$

จะเห็นได้ว่าค่าการไหลของเส้นทาง r_2 มีค่าเป็น 1 ช่องสัญญาณซึ่งมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ให้โอกาสเส้นทาง r_2 หากค่าการไหลได้ก่อนซึ่งจะได้ค่าการไหลเป็น 3 และได้เส้นทางบูรณะเป็น $R^i = \{r_1, r_2\}$ โดยสามารถหาค่าผลรวมการไหลสำหรับเส้นทางบูรณะได้ตามสมการ (3.7) คือ

$$F_R^i = f_1^i + f_2^i = 9 + 1 = 10$$

3. เมื่อได้ค่าการไหลที่มากที่สุดของทุกเส้นทางบูรณะแล้ว ลำดับถัดไปเราจะหาค่าน้ำหนักและความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบูรณะจากสมการ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ ซึ่งใช้ค่าน้ำหนักในการคำนวณ เพื่อเตรียมการไว้สำหรับการกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ

$$w_1^i = f_1^i = 9, w_2^i = f_2^i = 1$$

$$Pr_1^i = \frac{9}{9+1} = \frac{9}{10} = 0.9, Pr_2^i = \frac{1}{9+1} = \frac{1}{10} = 0.1$$

3.2.4.2 ส่วนกำหนดทราฟฟิก

1. จากขั้นตอนแรกเราได้ว่าปริมาณการไหลที่คำนวณได้ในขั้นตอนวางแผนมีค่ามากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^i > \Omega^i$) ดังนั้นเงื่อนไขบังคับจะเป็นไปตามสมการ (3.3) และ (3.4)

2. ในขั้นนี้จะแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นสองส่วนเพื่อเปรียบเทียบการคำนวณค่า Square Euclidean Distance สองวิธีคือส่วน ก แสดงวิธีการคำนวณตามสมการ (3.5) และส่วน ข แสดงการคำนวณวิธีวนซ้ำตามสมการ (3.6)

ตารางที่ 3.5 รูปแบบในการกำหนดทราฟฟิกแบบ ก.

รูปแบบ (j)	r_1	r_2	D^i
1	2	0	$D^i = \left(\frac{2}{2} - \frac{9}{10}\right)^2 + \left(\frac{0}{2} - \frac{1}{10}\right)^2 = 0.02$
2	1	1	$D^i = \left(\frac{1}{2} - \frac{9}{10}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{10}\right)^2 = 0.32$
3	0	2	—

ก. สามารถหาค่า Square Euclidean Distance (D^l) โดยอาศัยรูปแบบการกำหนดกราฟฟิคดังแสดงในตารางที่ 3.4 เพื่อช่วยในการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามรูปแบบพบว่า การกำหนดกราฟฟิคไปยังเส้นทางบูรณะตามรูปแบบที่ 1 คือ กำหนดกราฟฟิคที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายทั้งสองช่องสัญญาณไปยังเส้นทาง r_1 จะส่งผลให้ค่า D^l มีค่าต่ำที่สุด สำหรับรูปแบบที่ 3 นั้นไม่สามารถเป็นไปได้เนื่องจากเส้นทาง r_2 มีความจุสำรองไม่เพียงพอที่จะรองรับกราฟฟิค

ข. การหาค่า Square Euclidean Distance ($D^{n,l}$) ด้วยวิธีวนซ้ำจะได้เซต $\mathbf{N} = \{1, 2\}$ ในรอบแรก ($n=1$) จะทดลองกำหนดกราฟฟิค 1 ช่องสัญญาณไปยังทั้งสองเส้นทางเพื่อหาค่า $D^{1,l}$ ต่อจากนั้นนำผลการกำหนดกราฟฟิคจากรอบแรกมาใช้ในการคำนวณรอบที่สอง ($n=2$) และกำหนดความจุเสียหายไปยังทั้งสองเส้นทางเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าเช่นเดิมดังแสดงได้ต่อไปนี้

$$n=1 \quad D^{1,l} = \min(D_{1,1}^{1,l} + D_{2,1}^{1,l}, D_{2,1}^{1,l} + D_{2,2}^{1,l})$$

$$D^{1,l} = \min\left(\left(\frac{0+1}{1} - \frac{9}{10}\right)^2 + \left(\frac{0+0}{1} - \frac{1}{10}\right)^2, \left(\frac{0+0}{1} - \frac{9}{10}\right)^2 + \left(\frac{0+1}{1} - \frac{1}{10}\right)^2\right)$$

$$= \min(0.02, 1.62) = 0.02$$

$$n=2 \quad D^{2,l} = \min(D_{1,1}^{2,l} + D_{1,2}^{2,l})$$

$$D^{2,l} = \min\left(\left(\frac{1+1}{2} - \frac{9}{10}\right)^2 + \left(\frac{1+0}{2} - \frac{1}{10}\right)^2\right)$$

$$= \min(0.17) = 0.17$$

ตารางที่ 3.6 ผลการกำหนดกราฟฟิคไปยังเส้นทางบูรณะแบบ ข. (วิธีวนซ้ำ)

n	$D^{n,l}$		ผลการกำหนด เส้นทาง
	r_1	r_2	
1	0.02	1.62	r_1
2	0.17	–	r_1

ผลการกำหนดกราฟฟิกสำหรับวิธีวนซ้ำสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5 พบว่าการคำนวณที่ได้ให้ผลที่เป็นไปในแนวทางเดียวกับการคำนวณแบบแรกโดยการกำหนดกราฟฟิกทั้งสองช่องสัญญาณ ($\Omega' = 2$) ไปยังเส้นทาง r_1 และหากพิจารณาจากค่า Busy factor ของเส้นทาง r_1 ก็จะพบว่ามีย่าน้อยกว่าของเส้นทาง r_2 ส่วนค่าการไหลนั้นมีค่ามากกว่าเส้นทาง r_2 ทำให้การกำหนดกราฟฟิกมีแนวโน้มที่จะไปอยู่บนเส้นทาง r_1 มากกว่าเส้นทาง r_2 ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ของวิธีการบูรณะที่นำเสนอคือต้องการกระจายกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานน้อยกว่า โดยที่การกระจายกราฟฟิกนั้นก็ยังคำนึงถึงปริมาณความจุสำรองที่มีอยู่ในแต่ละเส้นทางด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนทั้งสองแบบจะเห็นได้ว่าหากกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบมีมาก รูปแบบที่จะกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะก็จะมีเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน การคำนวณวิธีวนซ้ำซึ่งเป็นการตัดตัวเลือกของรูปแบบที่ไม่เหมาะสมออกไปจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่า

3.3 ค่าการกระจายโหลด (Load Distribution Factor: LDF)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการนิยามค่าการกระจายโหลดจากค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงเมื่อพิจารณากรณีที่ข่ายเชื่อมโยง l^* ใดๆ ได้รับความเสียหายโดยมีตัวแปรที่ใช้ประกอบการพิจารณาดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.7 ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการ (3.15) ถึง (3.21)

U_l^i	ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง l หลังจากการบูรณะความเสียหาย
\bar{U}^i	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic average) ของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง
S^i	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย $G(V, E)$
LDF^{l^*}	ค่าการกระจายโหลดจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^*

ในกรณีที่ความเสียหายยังไม่เกิดขึ้น ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนที่แสดงถึงปริมาณความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้งานโดยเส้นทางใช้งาน (Working path) เทียบกับความจุทั้งหมดในข่ายเชื่อมโยง แต่ภายหลังการเกิดความเสียหายจะหาค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของความจุที่ถูกใช้งานเทียบกับความจุที่มีในข่ายเชื่อมโยงได้ดังสมการ (3.15) ส่วนความจุสำรองของแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ไป จะสามารถหาค่าใช้งานความจุสำรอง (Spare resource utilization) ของข่ายเชื่อมโยง ได้ดังสมการ (3.16) และค่าใช้งานความจุสำรองของ

โครงข่ายได้ตั้งสมการ (3.17) สมการ (3.18) แสดงถึงความจุสำรองที่ถูกใช้ในข่ายเชื่อมโยงโดยทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย

$$U_i^l = \frac{\rho_i^r}{wc_l + sc_l} \quad (3.15)$$

$$U_{sc,l}^l = \frac{\rho_{sc,l}^l}{sc_l} \quad (3.16)$$

$$\rho_{sc,l}^l = \sum_{i=1}^k \gamma_{i,l}^l \Omega_i^l \quad (3.17)$$

$$U_{sc,net}^l = \frac{\sum_{\forall l \in |E|} \rho_{sc,l}^l}{\sum_{\forall l \in |E|} sc_l} \quad (3.18)$$

ภายหลังจากการบูรณะค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงจะมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับก่อนเกิดความเสียหายหรือไม่ นั่นก็ขึ้นอยู่กับว่าข่ายเชื่อมโยงที่เราพิจารณาถูกใช้เป็นส่วนทางการบูรณะหรือไม่ และการที่จะบอกถึงการกระจายโหลดเราสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของค่าใช้งานของทุกข่ายเชื่อมโยงภายหลังการบูรณะโดยอาศัยสมการทางสถิติ ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เข้ามาช่วยในการประเมินและนิยามการกระจายของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงตั้งสมการ (3.19)

$$S^{l^*} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (U_l^{l^*} - \bar{U}^{l^*})^2}{|E|}} \quad (3.19)$$

ซึ่งในการพิจารณานี้ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง l^* มีค่าเป็น 0 เนื่องจากเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหาย ทราฟฟิกที่อยู่ในข่ายเชื่อมโยงนี้จะถูกย้ายไปอยู่ในข่ายเชื่อมโยงอื่นทั้งหมดโดยค่า \bar{U}^{l^*} ที่แสดงในสมการ 3.19 เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (3.20)

$$\bar{U}^{l^*} = \frac{\sum_{l \in E} U_l^{l^*}}{|E|} \quad (3.20)$$

ค่าที่ได้จากสมการ (3.19) นั้นไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบค่าระหว่างโครงข่ายได้โดยตรง ถ้าหากว่าโครงข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงไม่เท่ากัน จึงแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการทำให้เป็นมาตรฐาน

(Normalize) ด้วยการนำค่า \bar{U}^{i^*} ในสมการ (3.20) มาเป็นตัวหารและได้นิยามค่าการกระจายโหลดเพิ่มเติมจากสมการ (3.19) ได้ใหม่ดังแสดงในสมการ (3.21)

$$LDF^{i^*} = \frac{1}{\bar{U}^{i^*}} \sqrt{\frac{\sum_{i \in E} (U_i^{i^*} - \bar{U}^{i^*})^2}{|E|}} \quad (3.21)$$

ซึ่งค่าการกระจายโหลดที่ได้จากสมการ (3.21) นี้สามารถเปรียบเทียบทั้งภายในโครงข่ายเดียวกันและระหว่างโครงข่ายได้ สำหรับกรณีที่มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าแสดงว่าการกระจายปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ของกระบวนการบูรณะที่เลือกใช้ในโครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่ากรณีที่มีค่าการกระจายโหลดสูงกว่า หรือสามารถมองได้ว่าค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงสำหรับกรณีแรกมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงของทั้งโครงข่ายมากกว่า

3.4 สรุปสิ่งที่น่าสนใจ

ในบทนี้ได้นำเสนอแนวคิดหลักของวิทยานิพนธ์ โดยเริ่มจากการปรับปรุงการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกของการบูรณะให้ดีขึ้นจึงได้เสนอวิธีบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง โดยแบ่งการพัฒนาออกเป็นสามวิธี วิธีแรก LWR พิจารณาให้เส้นทางที่มีค่าใช้งานหรือ Busy factor ต่ำที่สุดมีโอกาสในการหาค่าการไหลก่อนเพื่อเป็นทางเลือกให้เกิดการใช้งานข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหายต่ำ วิธีที่สอง SWR จะพิจารณาค่าการไหลจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีแก้ปัญหาแบบวนซ้ำ (Iterative) ในการหาค่า Square Euclidean Distance เพื่อกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกดังกล่าวไปยังเส้นทางบูรณะตามปริมาณของค่าการไหลในแต่ละเส้นทาง วิธีที่สาม LSWR เป็นการนำข้อดีของทั้งสองวิธีมาใช้โดยพิจารณาทั้งค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายและสัดส่วนของทราฟฟิกที่จะกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางบูรณะเพื่อให้วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนสุดท้ายได้ยกตัวอย่างการคำนวณเบื้องต้นเพื่อแสดงการเลือกเส้นทางและข้อดีของการใช้วิธีแบบวนซ้ำ จากนั้นจึงได้นิยามค่าใช้งานแบบต่างๆ เพื่อปรับให้เข้ากับสถานการณ์ของการจำลอง และนำค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงภายหลังจากการบูรณะความเสียหายมาใช้ในการนิยามค่าการกระจายโหลดที่ได้นำเสนอ เพื่อใช้ประเมินค่าการกระจายของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายจากการใช้วิธีบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรนำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของวิธีการบูรณะและดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่นำเสนอ โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้ในการจำลองและพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลองเช่น แบบจำลองโครงข่ายที่จะนำมาทดสอบ ปริมาณการสื่อสารระหว่างคู่โหนด เป็นต้น ในส่วนที่สองจะเป็นผลที่ได้จากการใช้วิธีที่นำเสนอดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เปรียบเทียบกับวิธีการในประเภทเดียวกัน

4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลองและทดสอบ

ในการจำลองกระบวนการทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดสอบกับโครงข่าย 3 โครงข่ายได้แก่ โครงข่าย 11 โหนด 23 ข่ายเชื่อมโยง (LATA Network) โครงข่าย 12 โหนด 25 ข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย 16 โหนด 28 ข่ายเชื่อมโยง โดยโครงข่ายทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

โดยโครงข่ายที่ใช้ทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองชุดคือชุดที่ 1 โครงข่าย 11 โหนด 23 ข่ายเชื่อมโยงมีค่าการเชื่อมต่อเป็น 4.18 จะถูกกำหนดความจุสำรองและความจุใช้งานที่เหมาะสมเพื่อรับประกันอัตราการบูรณะร้อยละ 100 สำหรับความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงใดๆ [16], [17] ส่วนชุดที่ 2 คือ โครงข่ายที่เหลืออีก 2 โครงข่ายนั้นเป็นโครงข่ายสมมติจากงานวิจัย [23] โดยมีค่าการเชื่อมต่อ (Connectivity) แตกต่างกันไปคือ 4.18 และ 3.07 ตามลำดับซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดความจุใช้งานและความจุสำรองของโครงข่ายให้มีค่าเท่ากันคือ 100 และ 50 ช่องสัญญาณต่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ตามลำดับ ในส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดนั้นกำหนดให้ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดโดยให้ปริมาณทราฟฟิกที่ส่งถึงกันมีค่าคงที่ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะกำหนดให้เป็นแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยงคือไม่มีข่ายเชื่อมโยงอื่นเสียในเวลาเดียวกัน ดังนั้นรูปแบบความเสียหายที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะมีค่าเป็น $|E|$ โดยแต่ละรูปแบบมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายเท่ากัน และค่าดัชนีชี้วัดที่นำมาแสดงในผลการทดสอบทั้งหมดจึงเป็นค่าเฉลี่ยสำหรับทุกรูปแบบความเสียหายที่เป็นไปได้ของแต่ละโครงข่าย

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนในการทดสอบ

ในการทดสอบนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพื่อศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับผลที่ต้องการศึกษา และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้วิธีการบูรณะที่นำเสนอทั้งสามวิธี

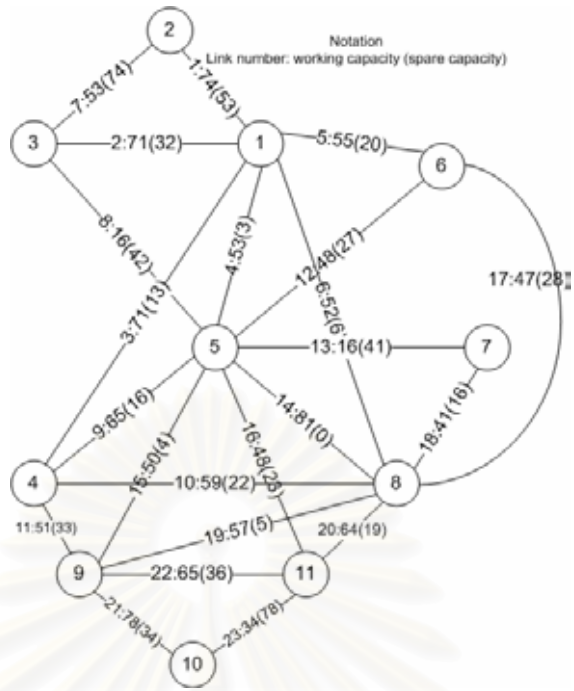
มาเทียบกับวิธีการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงมาตรฐานที่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งแสดงในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.6 ซึ่งจะเรียกแทนว่า SP เพื่อให้เห็นข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยมีพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนดังนี้

- ปริมาณความจุสำรองในโครงข่าย สำหรับโครงข่ายชุดทั้งสองชุดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 100 การปรับเปลี่ยนนี้จะทำให้การกำหนดเส้นทางที่จะนำมาใช้เป็นเส้นทางบูรณะเปลี่ยนไป เพื่อเป็นการทดสอบว่าแต่ละวิธีการนั้นมีผลต่ออัตราการบูรณะ และค่าการกระจายโหลดอย่างไรหรือมากน้อยเพียงใด
- ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง เป็นการจำกัดค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงไม่ให้เกิดค่าที่กำหนดไว้เพื่อทดสอบว่าหากทำการจำกัดค่าใช้งานดังกล่าวจะมีผลต่อการกระจายโหลดมากน้อยเพียงใด ซึ่งการปรับเปลี่ยนในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณกราฟฟิกร์ที่มีอยู่ในขณะนั้นด้วย กำหนดให้ค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 100
- ปริมาณกราฟฟิกร์ใช้งานในโครงข่าย เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณกราฟฟิกร์ใช้งานของโครงข่ายกับค่าความจุใช้งานของโครงข่าย ซึ่งการปรับเปลี่ยนนี้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 35 ถึง 70 เพื่อทดสอบว่าค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายซึ่งมีผลต่อค่า Busy factor ในสมการ (3.1) จะส่งผลอย่างไรต่อวิธีการบูรณะที่น่าเสนอ

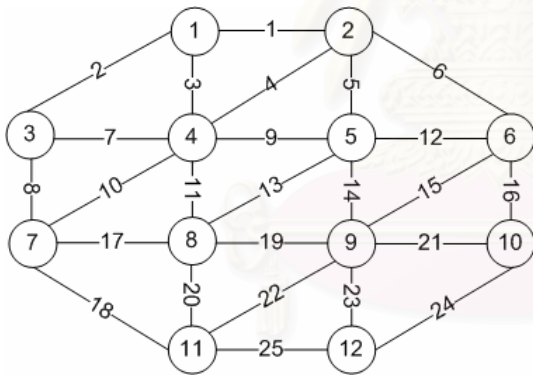
4.1.2 ดัชนีชี้วัดที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของการบูรณะ

การที่จะบอกว่าวิธีการที่ออกแบบให้ผลในทางที่ดีหรือตรงกับวัตถุประสงค์หรือไม่นั้นต้องอาศัยดัชนีชี้วัดเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบ โดยมีดัชนีชี้วัดที่ใช้ดังนี้

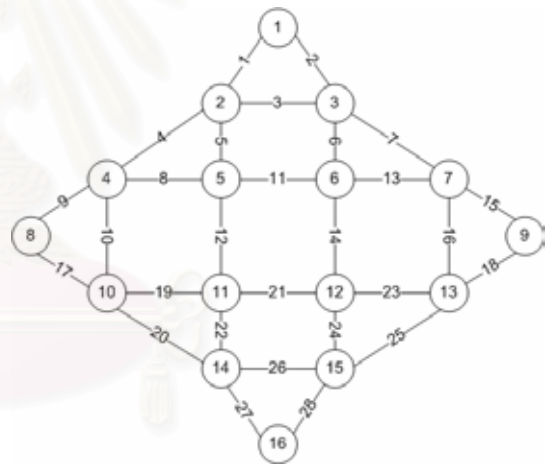
- อัตราการบูรณะเฉลี่ย ดังที่นิยามไว้ในหัวข้อ 2.3.7 เพื่อวัดสัดส่วนของกราฟฟิกร์ที่สามารถบูรณะได้จากความเสียหายที่เกิดขึ้น
- ค่าการกระจายโหลด ดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.2 สมการ (3.21) ซึ่งจะเรียกว่า LDF เพื่อทดสอบการแสดงผลของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอ ในการแสดงถึงการกระจายโหลดหรือกราฟฟิกร์ที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย
- ค่าใช้งานความจุสำรองข่ายเชื่อมโยง ดังที่นิยามไว้ในสมการ (3.16) เพื่อแสดงให้เห็นถึงการกระจายโหลดที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับความชัดเจนในการแสดงผลของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอ



(ก) โครงข่าย 11 โหนด 23 ข่ายเชื่อมโยง



(ข) โครงข่าย 12 โหนด 25 ข่ายเชื่อมโยง



(ค) โครงข่าย 16 โหนด 28 ข่ายเชื่อมโยง

รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

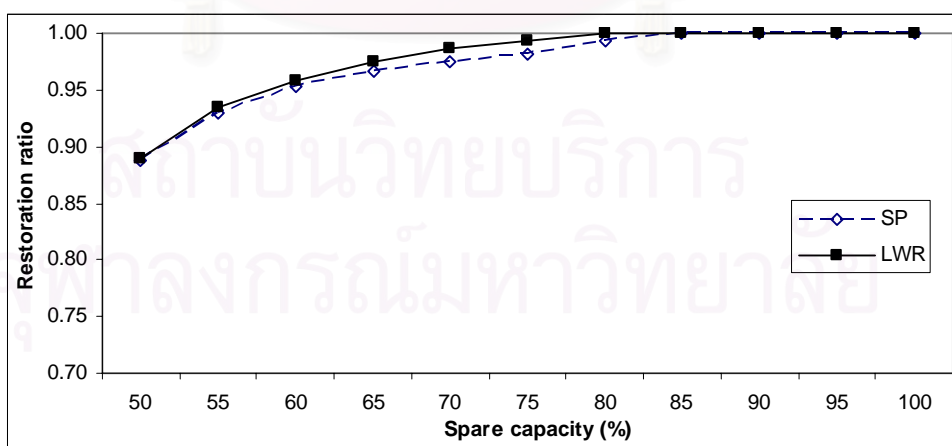
ในส่วนนี้จะแสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ที่ได้จากดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพและกระบวนการบูรณะที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบหาเส้นทางสั้นที่สุด (SP) และพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายความจุสำรองเพื่อทดสอบการแสดงผลของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ โดยการทดสอบนี้ได้ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1

4.2.1 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด

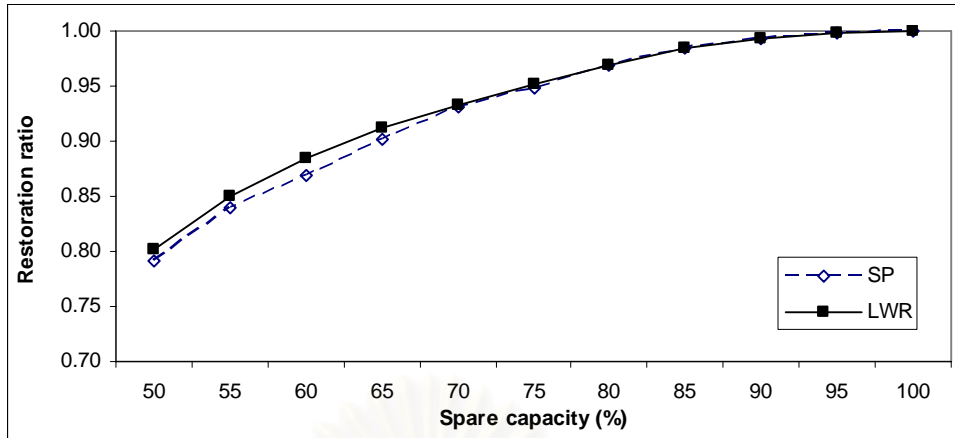
4.2.1.1 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก)

ผลการทดสอบที่แสดงต่อไปนี้เป็นผลการปรับเปลี่ยนค่าความจุสำรองของแต่ละข่ายเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนกับความจุสำรองที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้น โดยกำหนดให้ทราฟฟิกใช้งานในโครงข่ายมีค่าเป็นร้อยละ 35, 55 และ 70 ในรูปที่ 4.2-4.4 แสดงอัตราการบูรณะเฉลี่ยของวิธี LWR เปรียบเทียบกับวิธี SP โดยแกนตั้งแสดงอัตราการบูรณะเฉลี่ยและแกนนอนแสดงค่าความจุสำรองในรูปที่ 4.5-4.7 แสดงค่าการกระจายโหลดซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่น่าเสนอและสามารถเปรียบเทียบการแสดงผลได้จากค่าใช้งานความจุสำรองในรูปที่ 4.8-4.10 เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหายและกำหนดความจุสำรองร้อยละ 100 ส่วนรูปที่ 4.11 และ 4.10 แสดงค่าการกระจายโหลดเมื่อจำกัดค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงไม่ให้เกินค่าที่กำหนด ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 60 และ 70 ตามลำดับ

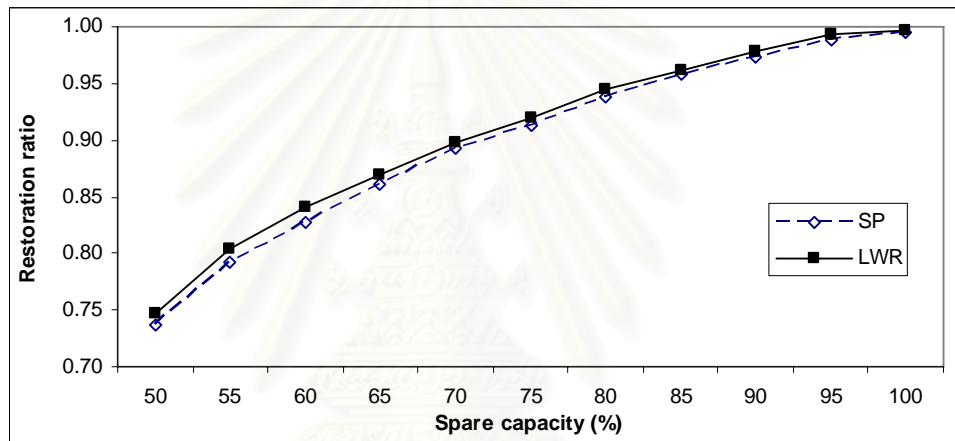
เมื่อค่าความจุสำรองลดต่ำลงพบว่าวิธี LWR มีค่าอัตราการบูรณะเฉลี่ยสูงกว่าวิธี SP เล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.4 เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณทราฟฟิกใช้งาน เนื่องจากวิธี LWR ไม่ได้จำกัดการใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน แต่เลือกเส้นทางจากค่า Busy Factor ที่ต่ำที่สุดทำให้รูปแบบการใช้เส้นทางแตกต่างออกไป ค่าการไหลสำหรับความเสียหายบางรูปแบบจึงมีค่ามากกว่าวิธี SP ส่งผลให้อัตราการบูรณะเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น แต่ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางก็มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงว่าวิธีการ LWR มีอัตราการบูรณะเฉลี่ยที่สูงกว่าวิธี SP ในขณะที่ใช้ความจุสำรองที่มีในโครงข่ายน้อยกว่า



รูปที่ 4.2 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35

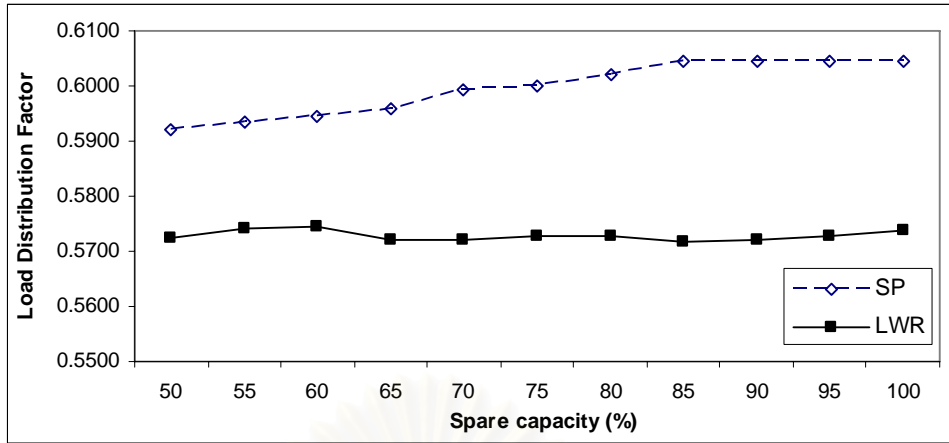


รูปที่ 4.3 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

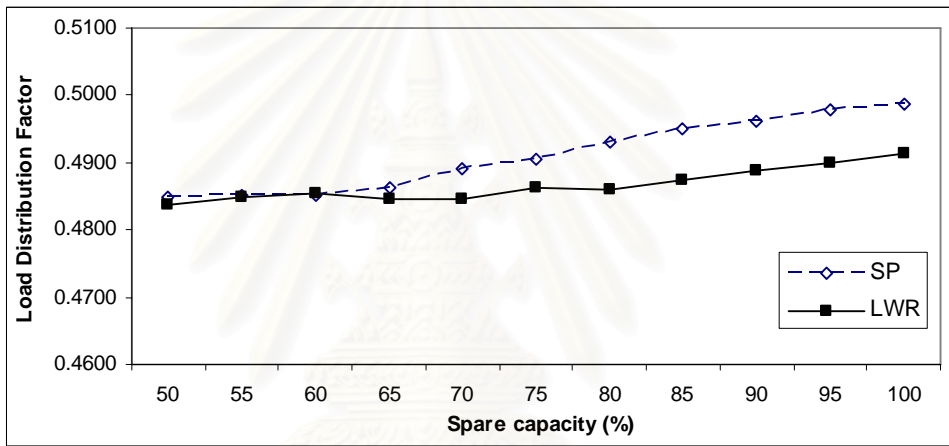


รูปที่ 4.4 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

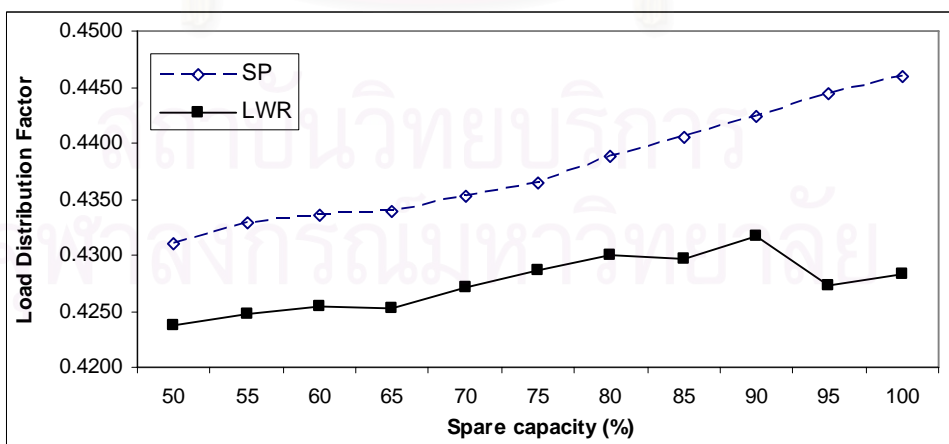
ในส่วนของการกระจายโหนดในรูปที่ 4.5-4.7 พบว่าวิธี LWR มีค่าการกระจายโหนดต่ำกว่าวิธี SP ทุกค่าปริมาณทราฟฟิกใช้งาน แสดงว่าวิธี LWR สามารถกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ในโครงข่ายได้ดีกว่าวิธี SP เนื่องจากทราฟฟิกดังกล่าวถูกย้ายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำ ทำให้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านั้นมีค่าใช้งานสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับค่าใช้งานเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายมากขึ้น แต่ทั้งสองวิธีจะมีค่าการกระจายโหนดลดลงเมื่อค่าทราฟฟิกใช้งานสูงขึ้น รวมทั้งในกรณีที่ความจุสำรองในโครงข่ายลดลง เพราะทั้งสองวิธีต้องให้ความจุสำรองมากกว่าเดิม ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องหรือถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะจึงมีค่าสูงและใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยมากขึ้น นั่นคือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบมีการกระจายมากขึ้นด้วยความจำเป็นที่ต้องให้ความจุสำรองมากขึ้น ดังตัวอย่างเมื่อข่ายเชื่อมโยง (1,4) เสียหาย



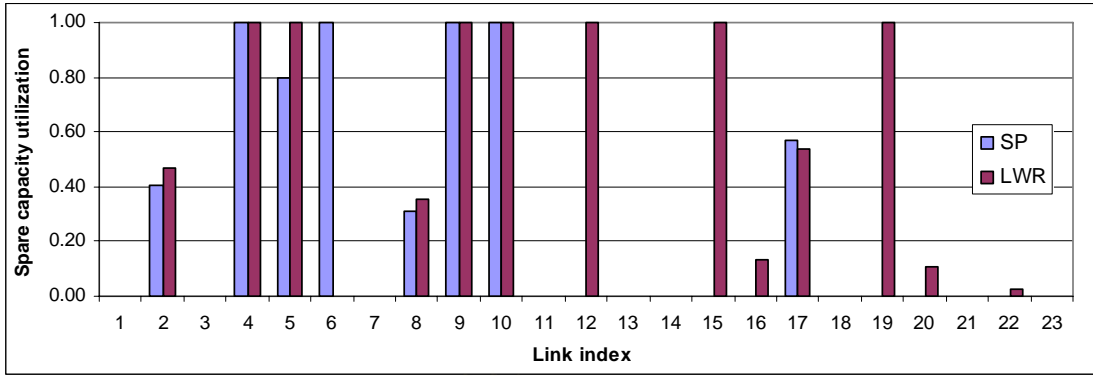
รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35



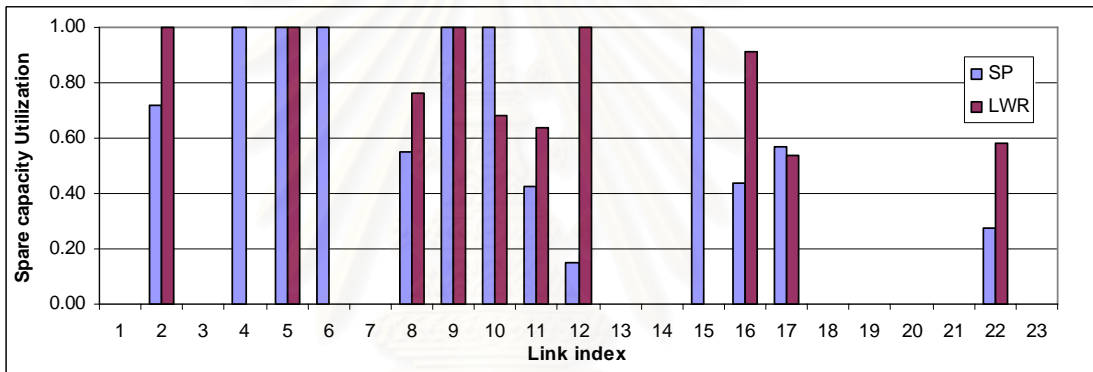
รูปที่ 4.6 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



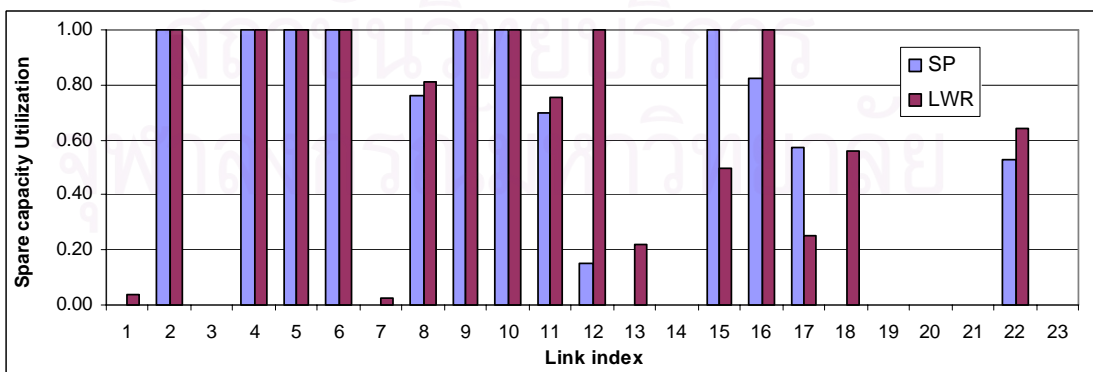
รูปที่ 4.7 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70



รูปที่ 4.8 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35

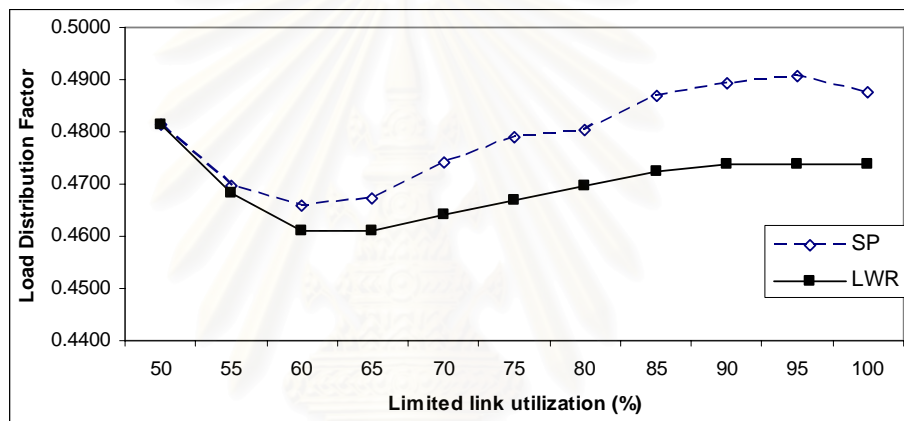


รูปที่ 4.9 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

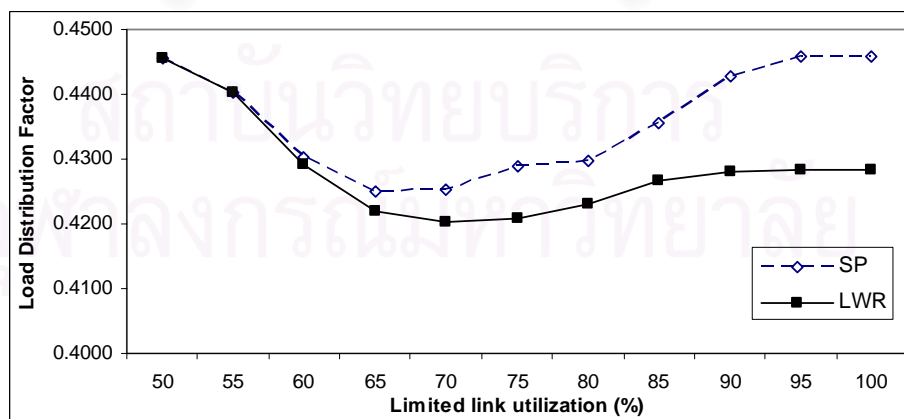


รูปที่ 4.10 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

จากรูปที่ 4.8-4.10 เป็นผลที่ได้จากปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายร้อยละ 100 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับวิธี LWR มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะมากกว่าวิธี SP จะเห็นได้จากข่ายเชื่อมโยงที่มีภาระใช้งานในวิธี LWR แต่ไม่ถูกใช้ในวิธี SP และมีค่าใช้งานความจุสำรองสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข่ายเชื่อมโยงเดียวกันที่มีค่าใช้งานความจุสำรองต่ำของวิธี SP โดยบางข่ายเชื่อมโยงก็ถูกใช้ความจุสำรองจนหมด นั่นแสดงว่าข่ายเชื่อมโยงนั้นอยู่ในเส้นทางที่มีค่า Busy factor ต่ำ ความจุสำรองจึงถูกใช้ไปมาก เช่นข่ายเชื่อมโยง 12 ที่วิธี SP ไม่ได้เลือกใช้ที่ปริมาณทราฟฟิกร้อยละ 35 นอกจากนั้นจะเห็นว่าข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ในวิธี LWR มีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกใช้งานซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่า Busy factor เช่น ข่ายเชื่อมโยง 4 ไม่ถูกใช้ที่ปริมาณทราฟฟิกร้อยละ 55



รูปที่ 4.11 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 60



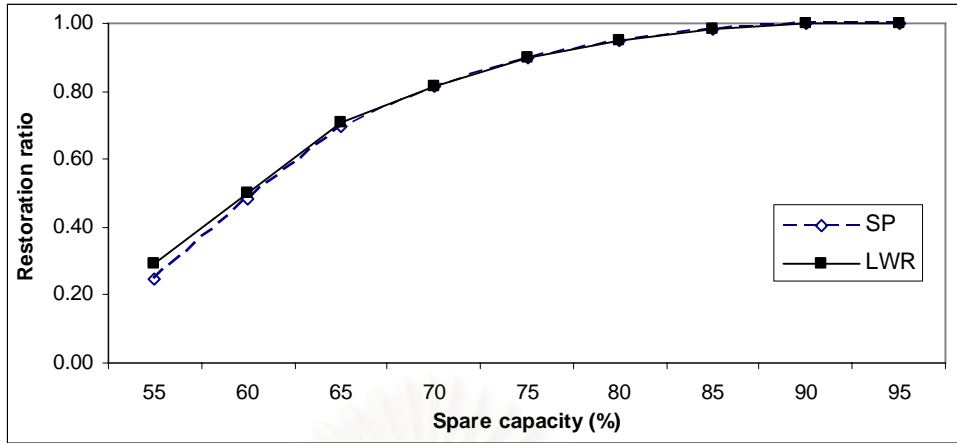
รูปที่ 4.12 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนการจำกัดค่าใช้งานชายเชื่อมโยงในโครงข่ายให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 50 ถึง 100 โดยยังคงค่าความจุสำรองอยู่ที่ร้อยละ 100 และกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกใช้งานมีค่าเป็นร้อยละ 60 และ 70 ในรูปที่ 4.11 พบว่าค่าการกระจายโหลดของทั้งสองวิธีมีค่าสูงที่การจำกัดค่าใช้งานไม่เกินร้อยละ 50 เนื่องจากมีชายเชื่อมโยงจำนวนน้อยที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้เพิ่มเติม นั่นคือเฉพาะชายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหายต่ำกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจึงไปกระจุกตัวอยู่ที่บางชายเชื่อมโยงที่สามารถรองรับทราฟฟิกได้เพิ่มเท่านั้น และมีค่าลดลงจนต่ำที่สุดเมื่อเพิ่มการจำกัดค่าใช้งานชายเชื่อมโยงไม่เกินร้อยละ 60 เช่นเดียวกับในรูปที่ 4.12 ที่ค่าการกระจายโหลดมีค่าต่ำสุดที่การจำกัดค่าใช้งานชายเชื่อมโยงไม่เกินร้อยละ 70 (สามารถกระจายโหลดได้ดีที่สุด) เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น การจำกัดค่าใช้งานชายเชื่อมโยงไม่เกินค่าเฉลี่ยดังกล่าวจึงส่งผลให้ชายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานเกินร้อยละ 70 ไม่ถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะ อัลกอริทึมจะเลือกเส้นทางอื่นที่มีค่าใช้งานต่ำกว่าทำให้ชายเชื่อมโยงที่ถูกเลือกใช้มีค่าใช้งานใกล้เคียงร้อยละ 70 มากขึ้น ส่วนชายเชื่อมโยงที่ไม่ถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะน่าจะมีค่าใช้งานชายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายที่เกิดจากการวางเส้นทางใช้งานในช่วงร้อยละ 45 ถึง 65 ทำให้ค่าการกระจายโหลดที่ได้จึงต่ำที่สุด หลังจากนั้นเมื่อการจำกัดค่าใช้งานมีผลลดลง (ร้อยละ 70-100) กระบวนการบูรณะจึงสามารถหาเส้นทางได้เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สามารถบูรณะได้มากที่สุด ส่งผลให้มีชายเชื่อมโยงที่ถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะมีจำนวนเพิ่มขึ้นและค่าใช้งานก็สูงขึ้น ทำให้ค่าการกระจายโหลดเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้น

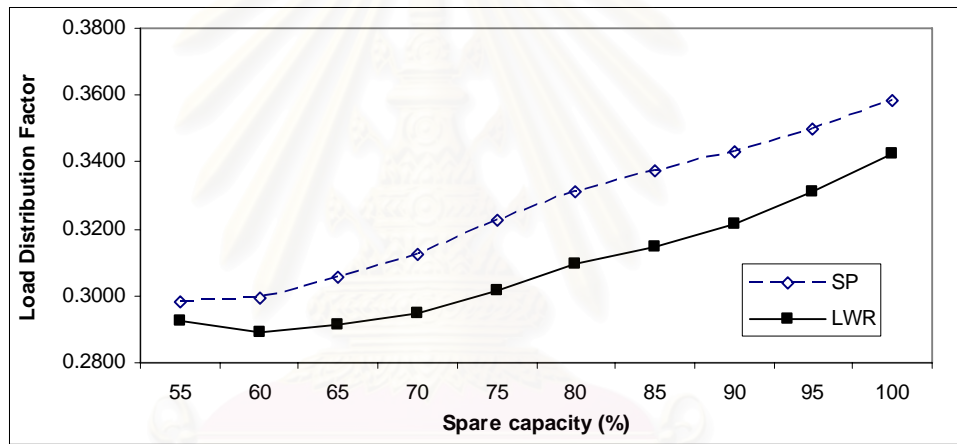
4.2.1.2 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข)

ในส่วนนี้จะทดสอบอัลกอริทึม LWR กับโครงข่าย (ข) 12 โหนด 25 ชายเชื่อมโยง ซึ่งมีความแตกต่างกับโครงข่าย (ก) คือมีความจุใช้งานและความจุสำรอง 100 และ 50 ช่องสัญญาณตามลำดับ โดยมีค่าการเชื่อมต่อเท่ากับโครงข่าย (ก) คือ 4.18 แต่มีความจุสำรองโดยรวมทั้งโครงข่ายมากกว่า กำหนดให้ทราฟฟิกใช้งานในโครงข่ายมีค่าเป็นร้อยละ 55

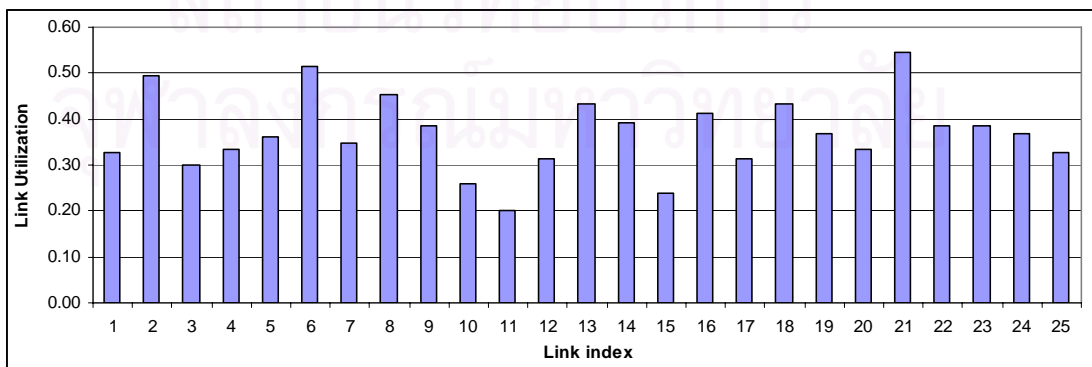
จากรูปที่ 4.13 พบว่าอัตราการบูรณะเฉลี่ยของวิธี LWR ดีกว่าวิธี SP เล็กน้อยเมื่อปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายลดลงที่ร้อยละ 55 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่าย (ก) ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการบูรณะลดลงด้วยอัตราที่รวดเร็วมากทั้ง ที่ปริมาณความจุสำรองทั้งหมดในโครงข่ายมีมากกว่า เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากลักษณะเฉพาะตัวของโครงข่าย (ข) ที่มีความจุใช้งานจำนวนมาก แม้ว่าปริมาณทราฟฟิกใช้งานจะเท่ากันที่ร้อยละ 55 แต่ก็เห็นได้ว่าวิธี LWR ก็ยังสามารถรับประกันอัตราการบูรณะเฉลี่ยได้ดีเท่ากับวิธี SP และยิ่งมากกว่าเมื่อปริมาณความจุสำรองลดลงด้วย



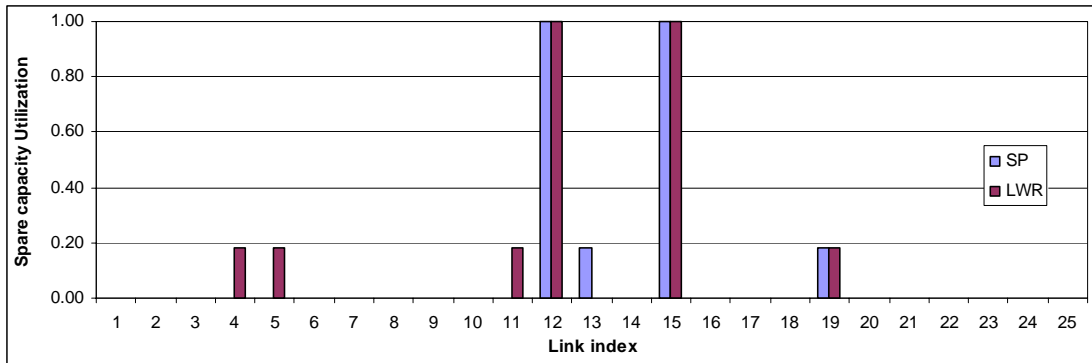
รูปที่ 4.13 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.14 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.15 ค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย (ข) ก่อนเกิดความเสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



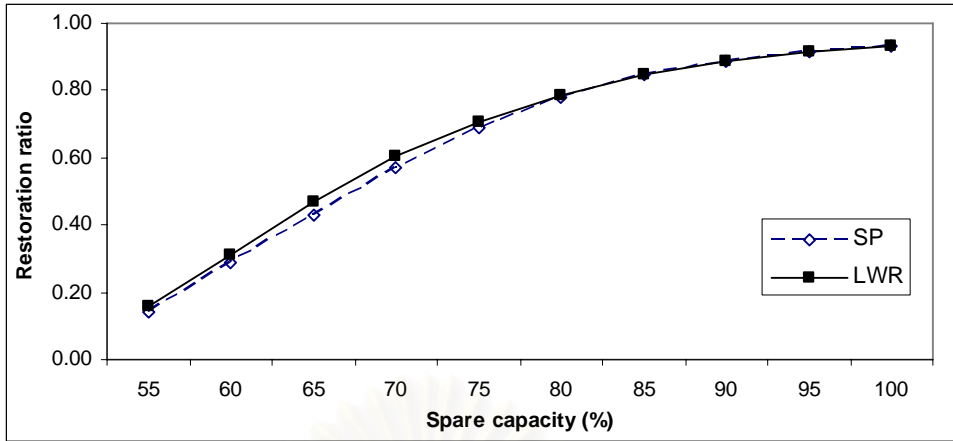
รูปที่ 4.16 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

ในรูปที่ 4.14 พบว่าวิธี LWR สามารถกระจายโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี SP นั่นคือมีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่า ซึ่งสามารถเห็นได้จากตัวอย่างเมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหายจะเห็นได้ว่าวิธี LWR พยายามหลีกเลี่ยงที่จะใช้งานข่ายเชื่อมโยง 13 ซึ่งมีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายสูงอยู่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ไปใช้ทางเลือกอื่นที่สามารถหาได้ ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยง 4, 5 และ 11 แทน แต่ข่ายเชื่อมโยง 12 15 และ 19 นั้นมีค่าใช้งานต่ำอยู่แล้ว จึงยังถูกเลือกใช้อยู่ แต่ค่าการกระจายโหลดของทั้งสองวิธีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีความจุสำรองในโครงข่ายสูงขึ้นก็เพราะว่าในแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีความจุสำรองอยู่มากจึง ไม่จำเป็นต้องใช้เส้นทางมารองรับทราฟฟิกมากนัก ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบก็จะอยู่บนข่ายเชื่อมโยงบางอันเท่านั้น เช่น ในรูปที่ 4.16 คือที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 100

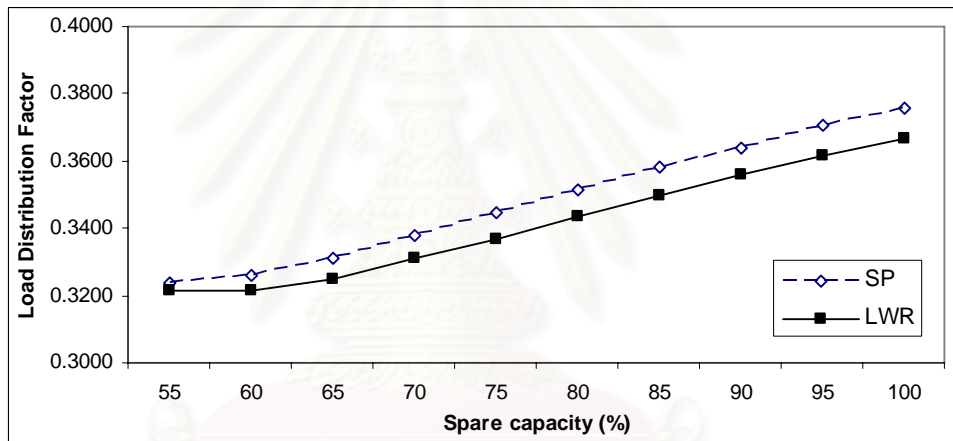
4.2.1.3 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค)

โครงข่ายที่ใช้ทดสอบในหัวข้อนี้มีค่าการเชื่อมต่อ 3.07 ซึ่งต่ำกว่าทั้งสองโครงข่ายข้างต้นมาก โดยความจุใช้งานและความจุสำรองมีค่าเป็น 100 และ 50 ช่องสัญญาณตามลำดับ กำหนดให้ทราฟฟิกใช้งานในโครงข่ายมีค่าเป็นร้อยละ 55 และได้ใช้แนวทางการแสดงผลเช่นเดียวกับที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น

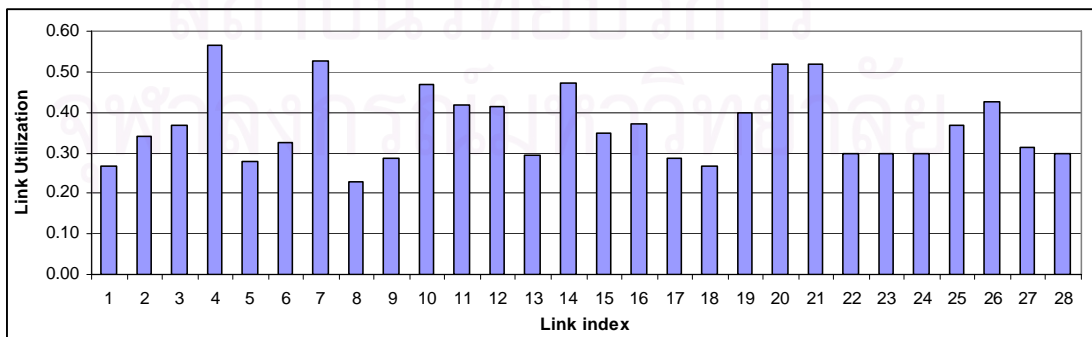
ในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าคุณลักษณะของโครงข่ายจะเปลี่ยนแปลงไปคือมีค่าการเชื่อมต่อที่ต่ำกว่าโครงข่ายอื่นๆ วิธี LWR ก็ยังคงมีอัตราการบูรณะเฉลี่ยสูงกว่าวิธี SP เล็กน้อยซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สามารถรับประกันอัตราการบูรณะได้ดีกว่าวิธี SP แม้ความจุสำรองในโครงข่ายจะลดลง



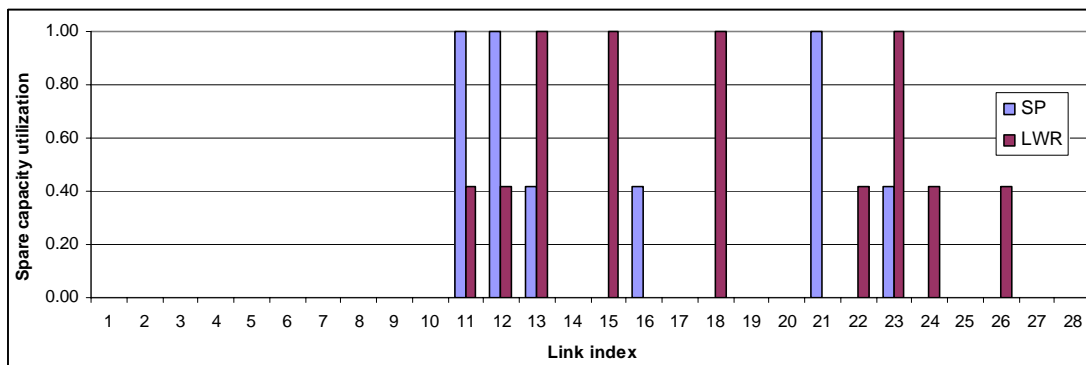
รูปที่ 4.17 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.18 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.19 ค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย (ข) ก่อนเกิดความเสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



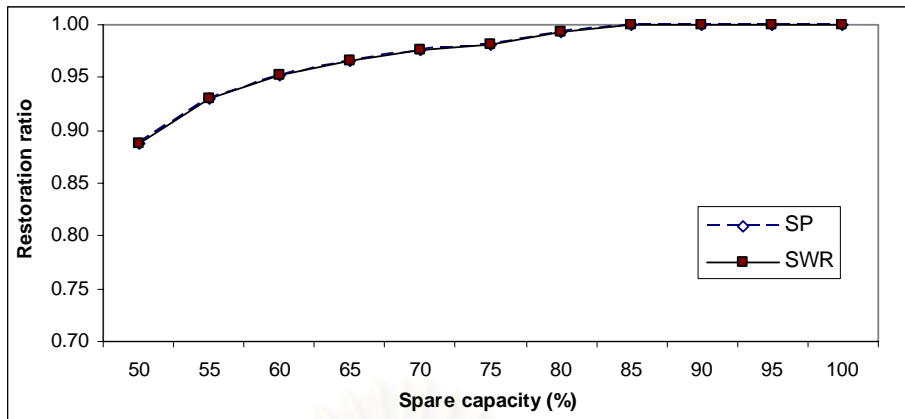
รูปที่ 4.20 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ค) วิธี LWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (6, 12) เสียหาย
ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

ค่าการกระจายโหลดของโครงข่ายนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งวิธี LWR ก็สามารถกระจายโหลดได้ดีกว่าวิธี SP คือมีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าแต่ก็ไม่สามารถทำได้ดีเท่ากับในโครงข่ายที่มีค่าการเชื่อมต่อดูงๆ เนื่องจากมีข่ายเชื่อมโยงให้เลือกใช้ได้น้อย ตัวอย่างการกระจายโหลดของวิธีนี้แสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าวิธี LWR จะไม่ใช้ข่ายเชื่อมโยง 21 และใช้งานความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยง 11 และ 12 น้อยลง เนื่องจากมีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายสูงอยู่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.19

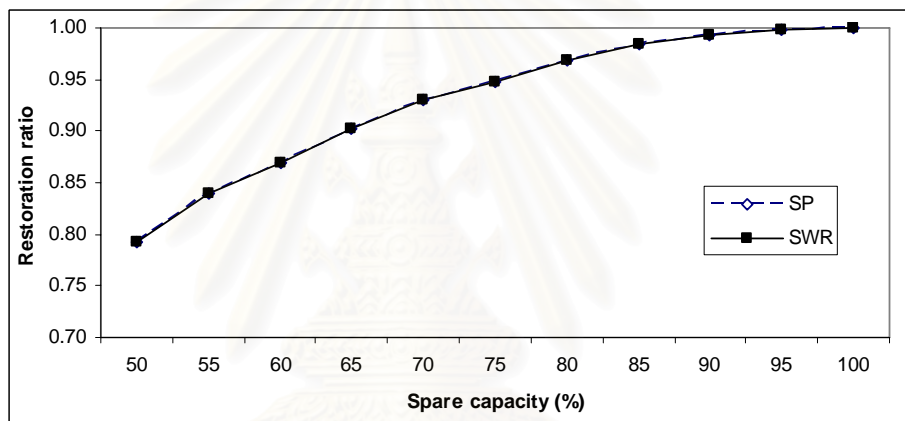
4.2.2 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง

4.2.2.1 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก)

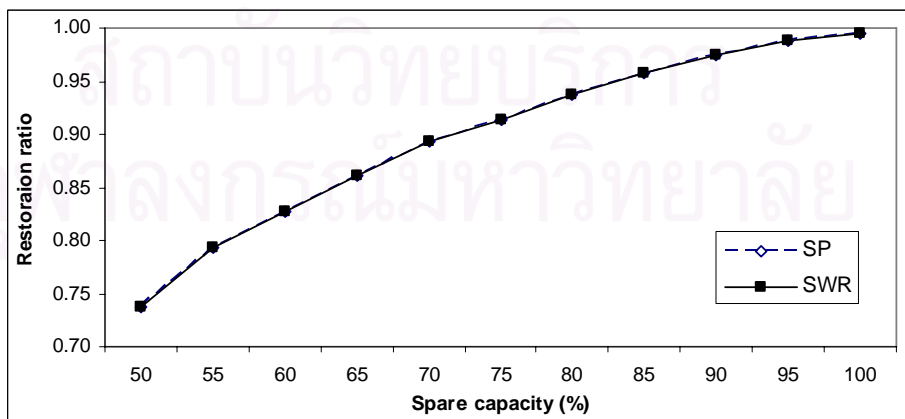
ผลการทดสอบสำหรับวิธีที่คำนึงถึงความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ของแต่ละเส้นทางเทียบกับวิธีที่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางบูรณะโดยการปรับเปลี่ยนค่าความจุสำรองของโครงข่าย เพื่อทดสอบอัตราการบูรณะเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 4.21-4.23 และการกระจายของโหลดหรือกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 4.24-4.26 ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35, 55 และ 70 จากนั้นได้ยกตัวอย่างความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เพื่อเชื่อมโยงให้เห็นถึงความชัดเจนของค่าการกระจายโหลดที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และได้ทดสอบผลของการจำกัดค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงไม่ให้เกินค่าที่กำหนด เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอในมุมมองที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหาย



รูปที่ 4.21 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทรัพยากรที่ใช้งาน ร้อยละ 35



รูปที่ 4.22 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทรัพยากรที่ใช้งาน ร้อยละ 55

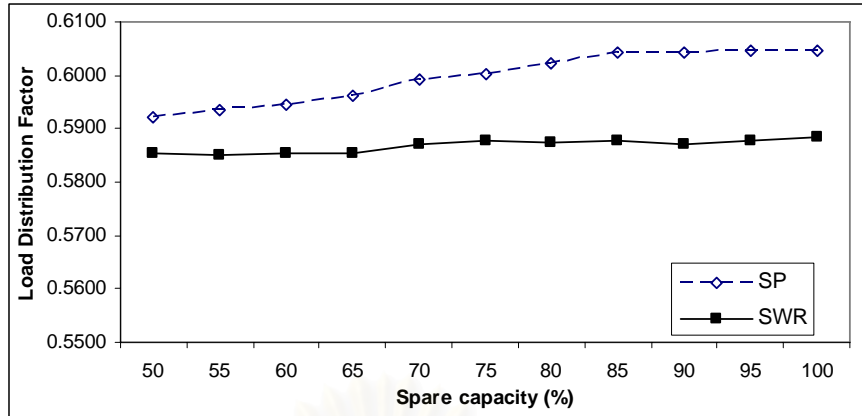


รูปที่ 4.23 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทรัพยากรที่ใช้งาน ร้อยละ 70

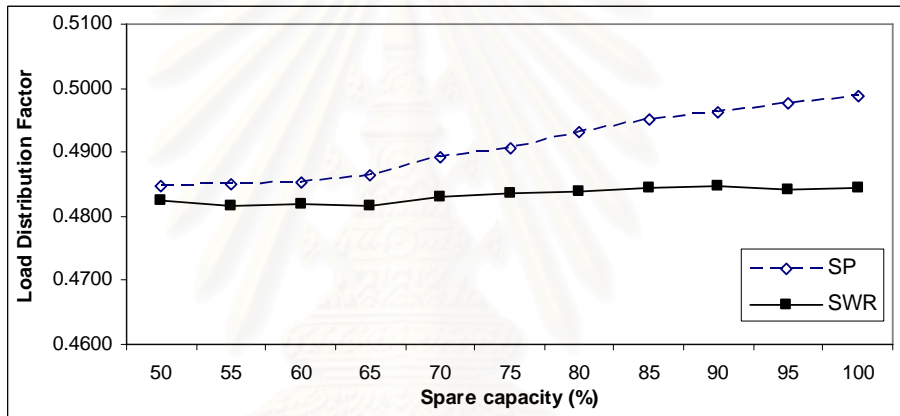
จากรูปที่ 4.21-4.23 พบว่าวิธี SWR สามารถรับประกันอัตราการบูรณะเฉลี่ยได้ดีเท่ากับวิธี SP เนื่องจากกว่าวิธีนี้คิดค้นเพื่อกระจายทรานซิปิกที่ ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามสัดส่วนของความจุสำรองที่ใช้งานได้ โดยวิธี SWR จะใช้กลไกการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเช่นเดียวกับวิธี SP ดังนั้นเซตของเส้นทางที่หาได้และการกำหนดทรานซิปิกจึงเป็นแบบเดียวกันทุกประการ ยกเว้นก็เพียงกระบวนการกำหนดทรานซิปิกที่จะทำงานเมื่อผลรวมค่าการไหลของเซตเส้นทางบูรณะมีค่ามากกว่าปริมาณทรานซิปิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^I > \Omega^I$) ส่งผลให้อัตราการบูรณะเฉลี่ยมีค่าคงเดิมเช่นเดียวกับวิธี SP

ส่วนค่าการกระจายไหลที่แสดงในรูปที่ 4.24-4.26 แสดงให้เห็นได้ว่าวิธี SWR สามารถกระจายทรานซิปิกที่ ได้รับผลกระทบจากความเสียหายได้ดีกว่าวิธี SP ค่าการกระจายไหลของวิธี SWR จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความจุสำรองในโครงข่ายเพิ่มขึ้นหรือสามารถกระจายทรานซิปิกได้น้อยลง โดยที่ปริมาณทรานซิปิกใช้งานค่าต่างๆ เช่นที่ร้อยละ 35 มีความสามารถในการกระจายไหลที่ดีกว่าวิธี SP ค่อนข้างมากเนื่องจากมีความจุสำรองมากเพียงพอที่จะเลือกใช้ได้อย่างเต็มที่เมื่อมีความจุสำรองมาก อัตราการบูรณะเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้วิธี SWR สามารถใช้กระจายไหลได้ดีขึ้นสำหรับบางรูปแบบความเสียหายที่อัตราการบูรณะร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่าการกระจายไหลเฉลี่ยของทั้งโครงข่ายมีค่าต่ำหรือสามารถกระจายไหลได้ดีกว่าวิธี SP เมื่อพิจารณาต่อเนื่องที่ปริมาณทรานซิปิกใช้งานร้อยละ 55 และ 70 พบว่าทั้งสองวิธีมีค่าการกระจายไหลต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเทียบกับที่ปริมาณทรานซิปิกใช้งานต่ำกว่าเช่นเดียวกับวิธี LWR

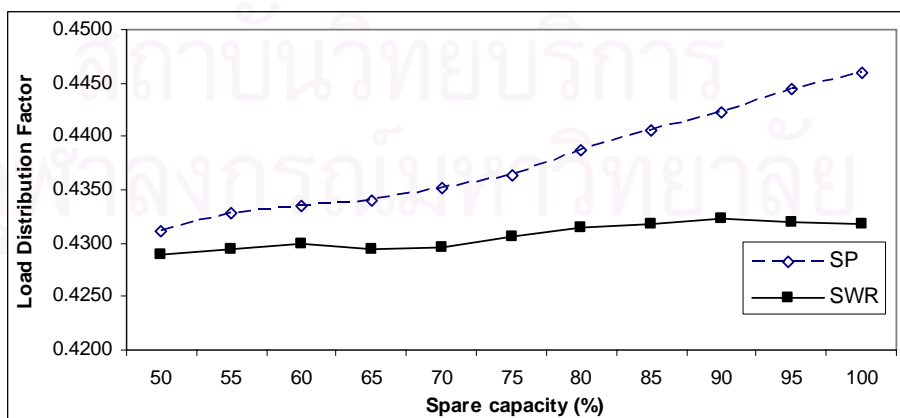
ในการทดสอบที่ปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายเป็นร้อยละ 100 จากรูปที่ 4.27 ที่ปริมาณทรานซิปิกใช้งานร้อยละ 35 พบว่าวิธี SWR พยายามที่จะกระจายทรานซิปิกไปยังหลายเส้นทางเพื่อเพิ่มการใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ หรือลดการใช้ความจุสำรองในบางข่ายเชื่อมโยงจนหมดดังจะเห็นได้จากการใช้ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 12 15 16 และ 22 เพิ่มจากวิธี SP ซึ่งกลไกนี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าการกระจายไหลของวิธีนี้ต่ำกว่าวิธี SP ในรูปที่ 4.28 ที่ปริมาณทรานซิปิกใช้งานร้อยละ 55 พบว่าทั้งสองวิธีมีการใช้เส้นทางหรือข่ายเชื่อมโยงเดียวกันทั้งหมดแต่การใช้ความจุสำรองของวิธี SWR เกิดการกระจายของทรานซิปิกมากกว่าดังจะเห็นได้ว่าข่ายเชื่อมโยงใดที่ถูกใช้ความจุสำรองจนหมดหรือมีค่าใช้งานเป็น 1 ในวิธี SP แต่วิธี SWR พยายามที่จะลดการใช้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านั้นและไปใช้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำแทน ส่วนในรูปที่ 4.29 พบว่าวิธี SWR ไม่มีทางเลือกในการกระจายทรานซิปิกเนื่องจากผลรวมค่าการไหลของเส้นทางบูรณะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณทรานซิปิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ($F_R^I \leq \Omega^I$) ปริมาณทรานซิปิกที่กำหนดไปยังแต่ละเส้นทางจึงมีค่าเท่ากับค่าการไหลของแต่ละเส้นทางบูรณะดังแสดงในสมการ (3.21) ซึ่งมีผลเหมือนกับการใช้วิธี SP



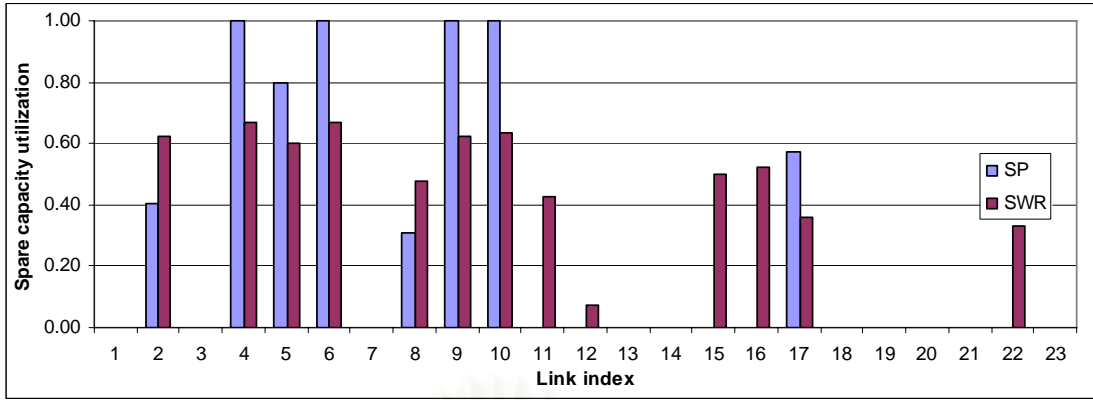
รูปที่ 4.24 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 35



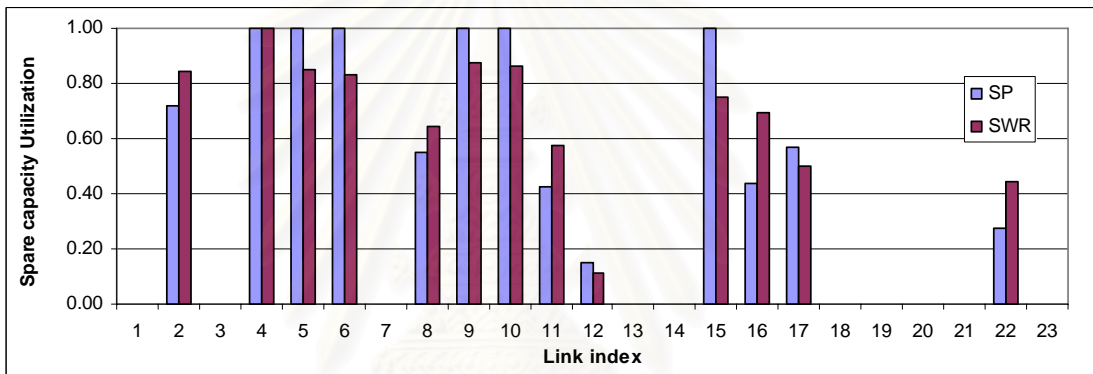
รูปที่ 4.25 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 55



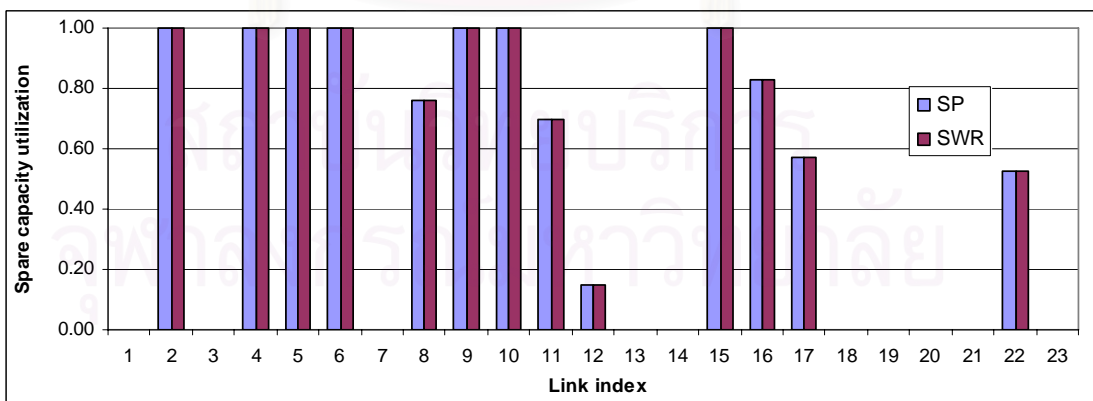
รูปที่ 4.26 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 70



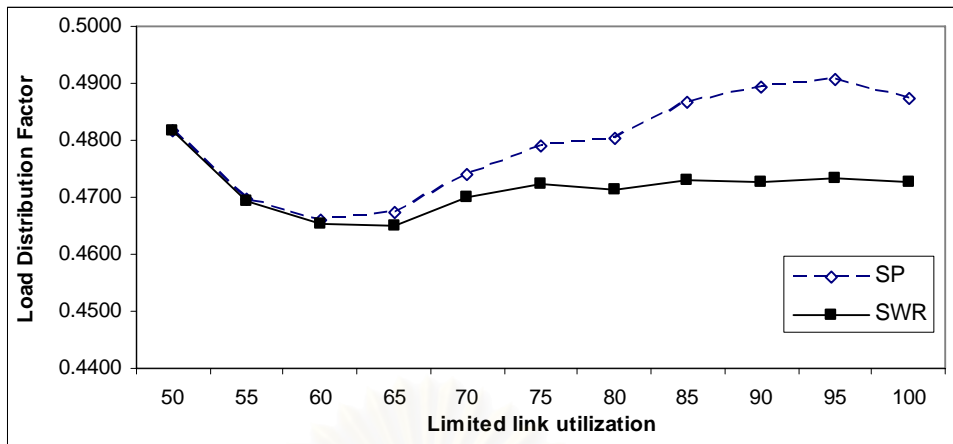
รูปที่ 4.27 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35



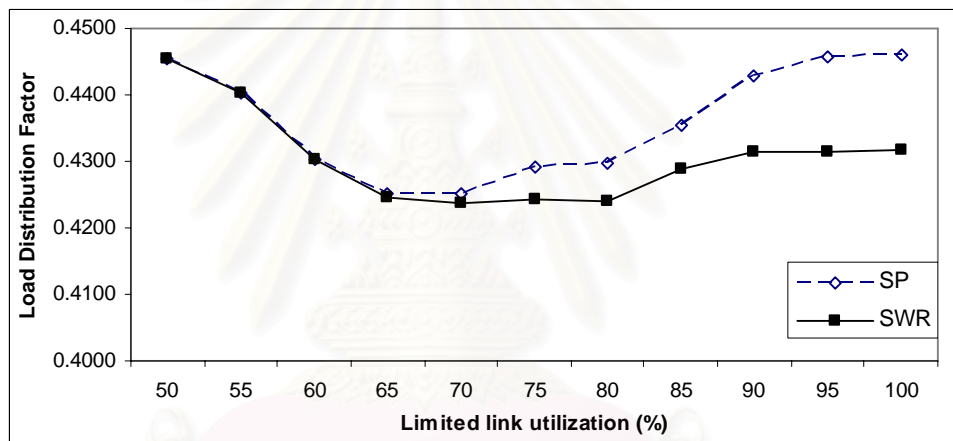
รูปที่ 4.28 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.29 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70



รูปที่ 4.30 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 60

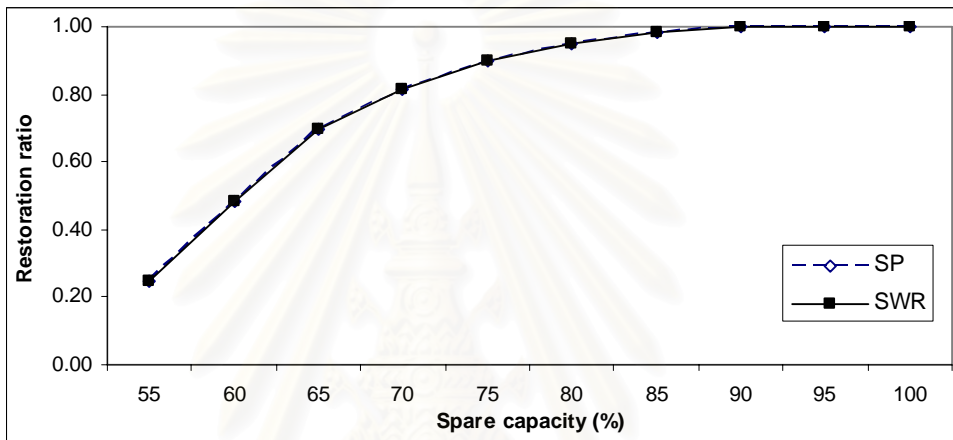


รูปที่ 4.31 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

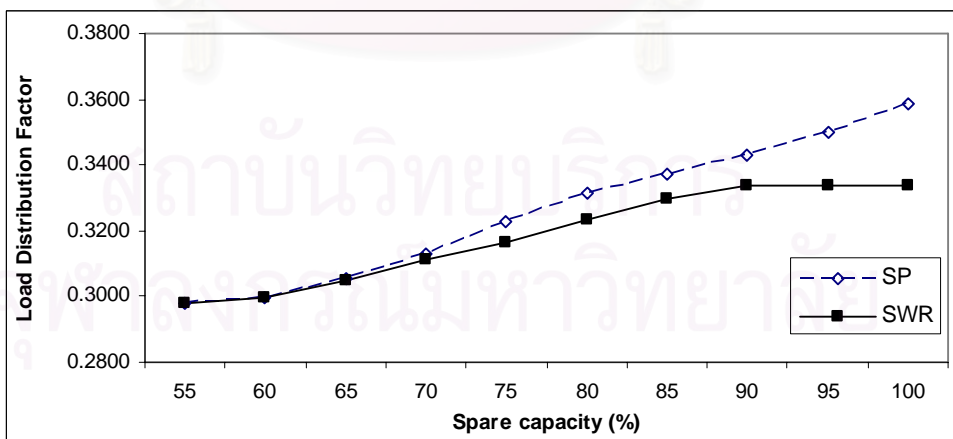
เมื่อทำการทดสอบโดยจำกัดค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงไม่ให้เกินค่าที่กำหนดพบว่ค่าการกระจายโหลดของวิธี SWR มีแนวโน้มเช่นเดียวกับวิธี LWR โดยมีค่าต่ำที่สุดในช่วงการจำกัดค่าใช้งานไม่เกินร้อยละ 60 และ 70 ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 60 และ 70 ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกันคือ หากข่ายเชื่อมโยงใดที่มีค่าใช้งานไม่ถึงการจำกัดค่าใช้งาน เช่นร้อยละ 70 อัลกอริทึมก็จะเลือกเส้นทางที่มีข่ายเชื่อมโยงนั้นมาใช้เป็นเส้นทางบูรณะ อีกทั้งข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ถูกใช้ก็มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายที่เกิดจากการสุ่มกำหนดเส้นทางใช้งานในช่วงร้อยละ 45 ถึง 65 ทำให้ค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นจึงได้ค่าการกระจายโหลดต่ำที่สุด จากนั้นเมื่อการจำกัดค่าใช้งานมีผลลดลง ค่าการกระจายโหลดก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยที่วิธี SWR มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ช้ากว่าวิธี SP

4.2.2.2 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข)

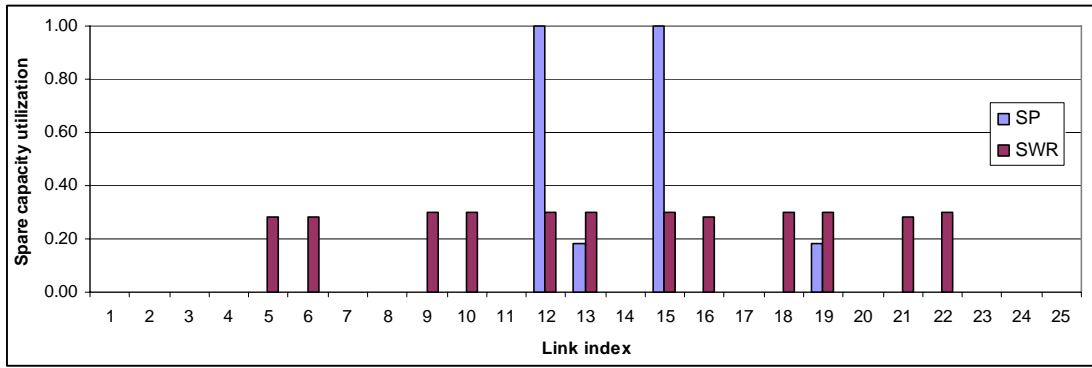
การทดสอบในส่วนนี้มีจุดประสงค์เช่นเดียวกับการทดสอบของวิธี LWR เพื่อต้องการเห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี SWR ต่อโครงข่ายที่มีความจุใช้งานและความจุสำรองจำนวนมาก เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55 ในรูปที่ 4.32 พบว่าอัตราการบูรณะเฉลี่ยไม่ต่างไปจากวิธี SP เนื่องจากในส่วนสร้างเส้นทางใช้วิธีการเดียวกันและเป็นกลุ่มของเส้นทางชุดเดียวกัน แต่ก็ยังเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือสามารถกระจายโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.33 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี SWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

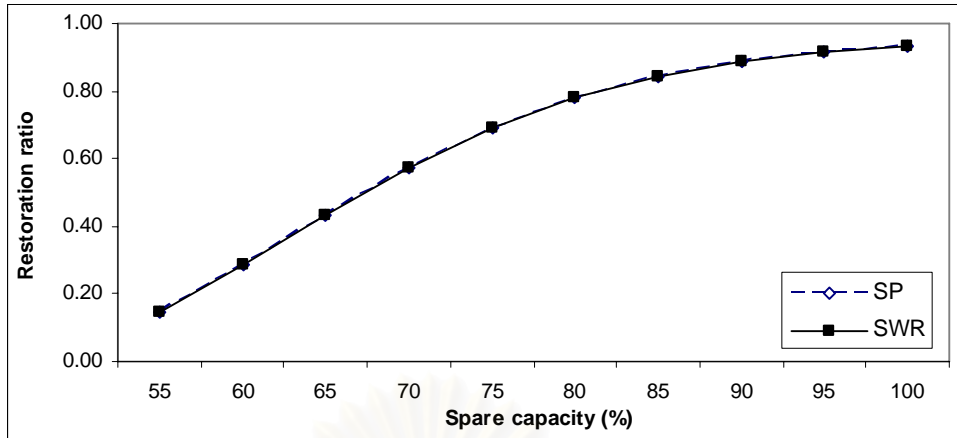


รูปที่ 4.34 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

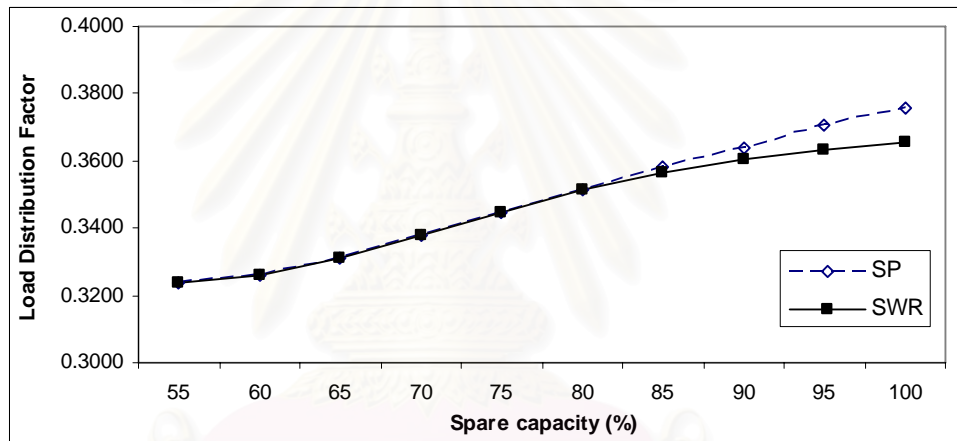
ในด้านของประสิทธิภาพการกระจายโหลดเห็นได้ว่าวิธีนี้ไม่สามารถทำได้ดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี LWR ของโครงข่ายเดียวกันดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.33 ที่จะมีประสิทธิภาพการกระจายโหลดดีกว่าวิธี LWR เมื่อปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายมีมากกว่าร้อยละ 70 เท่านั้น เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากหลายรูปแบบความเสียหายไม่สามารถบูรณะทราฟฟิกได้ครบกลไกการกระจายโหลดก็จะไม่ทำงานแต่เมื่อความจุสำรองมีมากขึ้นกลไกดังกล่าวจึงทำงานดังจะเห็นได้ในรูปที่ 4.34 ที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 100 จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้พยายามที่จะกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ไม่ให้กระจุกตัวอยู่ที่บางข่ายเชื่อมโยง เพื่อลดการใช้ความจุสำรองจนหมด ไม่ทำให้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้เปราะบางและมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายมากขึ้น

4.2.2.3 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค)

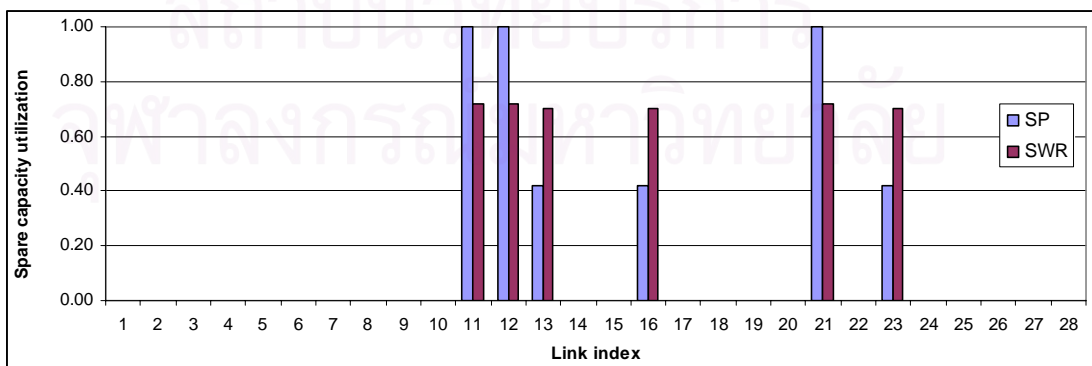
ในส่วนนี้จะทดสอบวิธี SWR กับโครงข่ายที่มีค่าการเชื่อมต่อต่ำซึ่งจำนวนเส้นทางที่สามารถใช้เป็นเส้นทางบูรณะได้ก็จะน้อยลงไปด้วย ซึ่งผลที่ได้จากอัตราการบูรณะเฉลี่ยก็ยังเป็นไปตามที่คาดไว้คือสามารถรับประกันอัตราการบูรณะได้ดีเท่ากับวิธี SP เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.35 และเนื่องจากว่าโครงข่ายนี้มีค่าการเชื่อมต่อเพียง 3.07 ดังนั้นที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55 ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณทราฟฟิกใช้งานที่โครงข่าย (ค) สามารถรองรับได้ แม้ว่าจะมีปริมาณความจุสำรองเป็นร้อยละ 100 แต่อัตราการบูรณะเฉลี่ยก็ยังไม่สามารถทำได้ถึง 1.00 เพราะหาเส้นทางที่สามารถเลือกใช้ได้มีน้อย ซึ่งลักษณะของโครงข่ายเช่นนี้ก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกระจายโหลดแย่งลงดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 55



รูปที่ 4.36 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ค) วิธี SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 55



รูปที่ 4.37 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ค) วิธี SWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหาย ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน 55

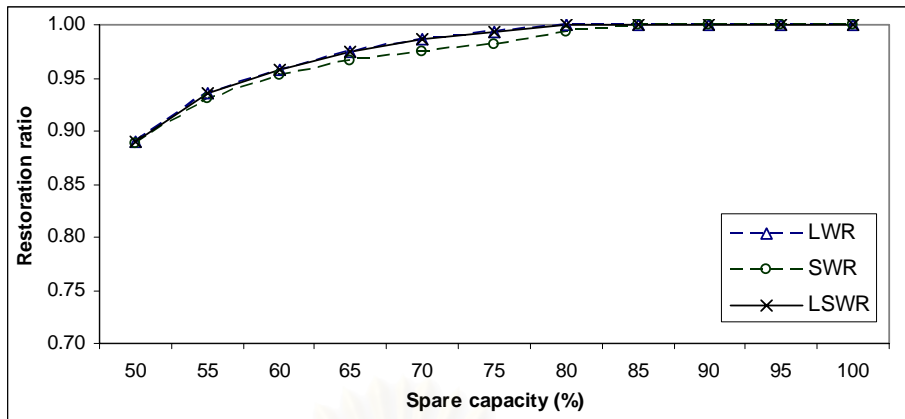
ในรูปที่ 4.36 พบว่าวิธี SWR มีประสิทธิภาพในการกระจายโหลดดีกว่าวิธี SP เมื่อปริมาณความจุสำรองในโครงข่ายมากกว่าร้อยละ 85 ก็เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของโครงข่ายนี้ที่มีค่าการเชื่อมต่อต่ำและต้องรองรับปริมาณทราฟฟิกใช้งานสูง รูปแบบความเสียหายจำนวนมากจึงต้องการปริมาณความจุสำรองสูงในการบูรณะทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ รูปที่ 4.37 แสดงค่าใช้งานความจุสำรองที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 100 จะเห็นว่าวิธี SWR จะลดการใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงจนหมดซึ่งวิธีนี้ช่วยลดความเปราะบาง (Vulnerability) ของโครงข่ายได้ เมื่อเกิดความเสียหายในลำดับถัดมา

4.2.3 วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง

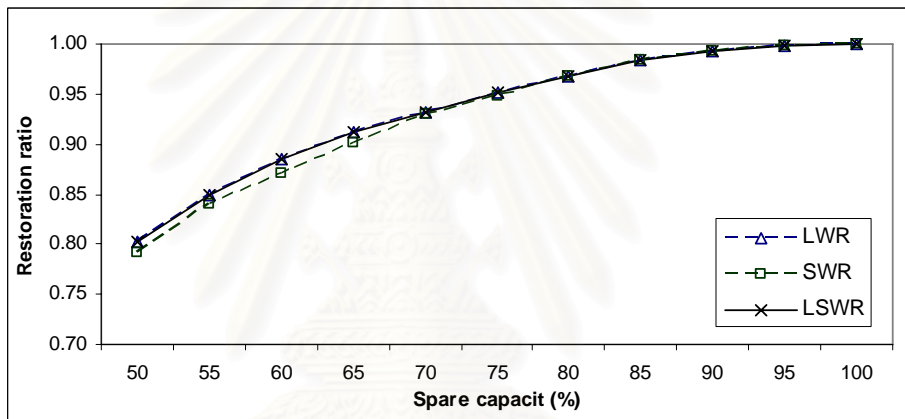
4.2.3.1 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ก)

ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 วิธีการ LSWR เป็นการนำข้อดีของทั้งสองวิธีการมาใช้ร่วมกันโดยนำข้อดีด้านการกระจายทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำของวิธี LWR และข้อดีของวิธี SWR ด้านการกำหนดทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายเป็นสัดส่วนกับค่าการไหลที่เป็นไปได้ของแต่ละเส้นทาง ซึ่งจะทำให้ได้ก็ต่อเมื่อผลรวมค่าการไหลมีค่ามากกว่าทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ($F_R^I > \Omega^I$) ในรูปที่ 4.38-4.40 และรูปที่ 4.41-4.43 จะทดสอบอัตราการบูรณะเฉลี่ยและค่าการกระจายโหลดตามลำดับ โดยการปรับเปลี่ยนความจุสำรองตั้งแต่อ้อยละ 50 ถึง 100 ที่ปริมาณทราฟฟิกอ้อยละ 35, 50 และ 70 เช่นเดิมแต่จะนำไปเปรียบเทียบกับสองวิธีการที่นำเสนอข้างต้นคือวิธี LWR และวิธี SWR เพื่อให้เห็นข้อดีที่ได้จากทั้งสองวิธี และได้ยกตัวอย่างความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เพื่อเชื่อมโยงให้เห็นความชัดเจนที่ได้จากค่าการกระจายโหลดที่นำเสนอ และส่วนสุดท้ายได้ทดสอบการกระจายโหลดของวิธีที่นำเสนอเมื่อปรับเปลี่ยนการจำกัดค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงไม่ให้เกินค่าที่กำหนด ซึ่งได้ทดสอบที่ปริมาณทราฟฟิกอ้อยละ 60 และ 70

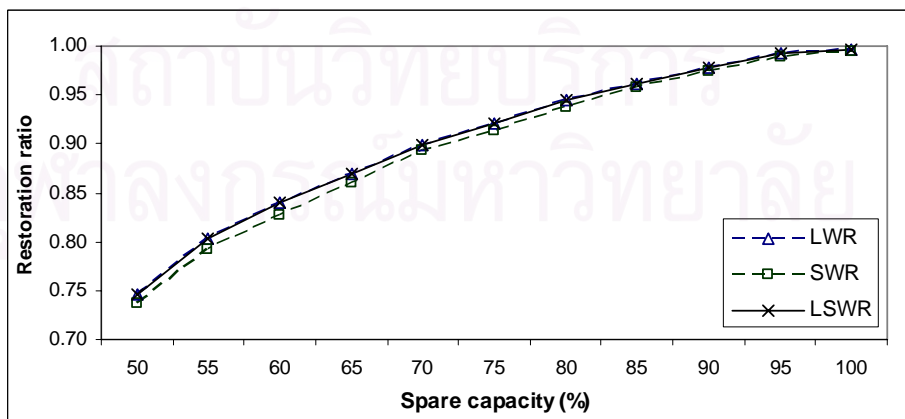
ผลของอัตราการบูรณะเฉลี่ยที่แสดงในรูปที่ 4.38-4.40 แสดงให้เห็นว่าวิธี LSWR นำข้อดีของวิธี LWR มาใช้คือกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่ข่ายเชื่อมโยงมีค่าใช้งานต่ำหรือให้โอกาสในการหาค่าการไหลแก่เส้นทางที่มีค่า Busy factor ต่ำกว่าก่อน ทำให้มีทางเลือกของเส้นทางที่แตกต่างจากวิธี SWR ที่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดแบบเดียวกับวิธี SP ส่งผลให้ค่าการไหลสำหรับบางรูปแบบความเสียหายของวิธี LSWR มีค่าสูงกว่าวิธี SP อัตราการบูรณะเฉลี่ยทั้งโครงข่ายจึงมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับวิธี LWR



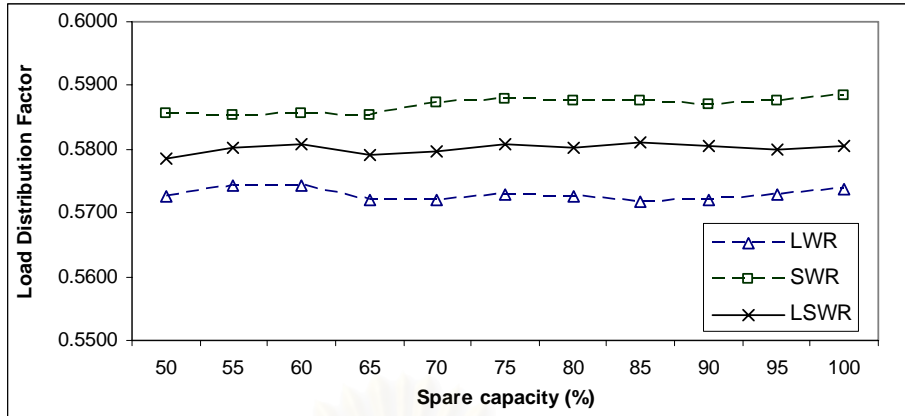
รูปที่ 4.38 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 35



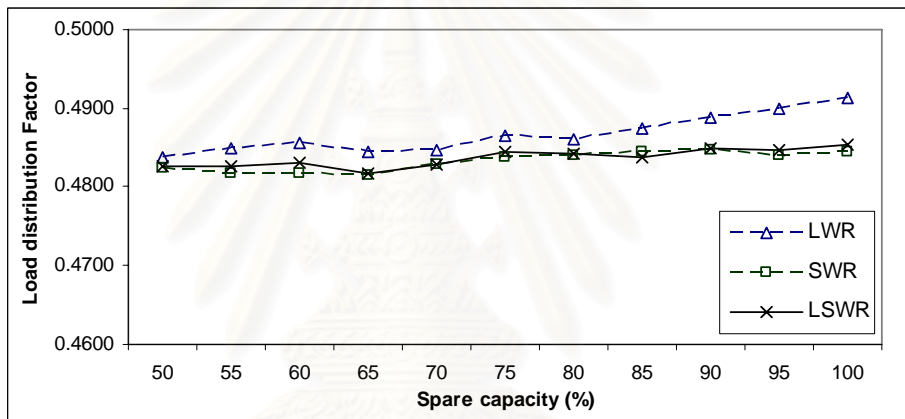
รูปที่ 4.39 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 55



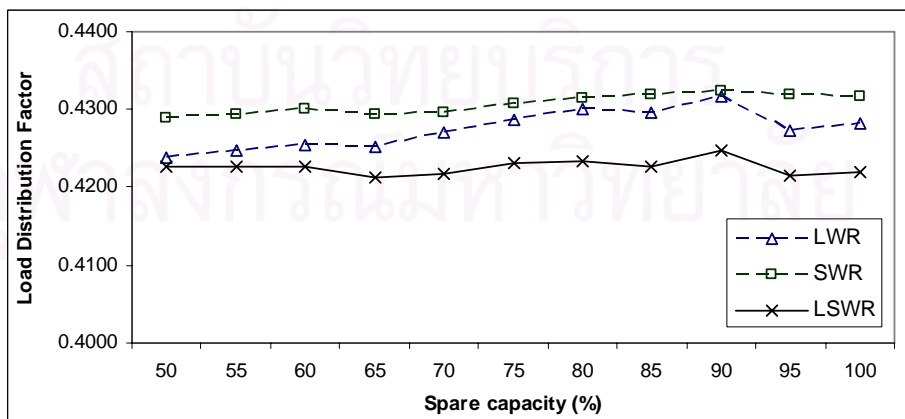
รูปที่ 4.40 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 70



รูปที่ 4.41 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 35



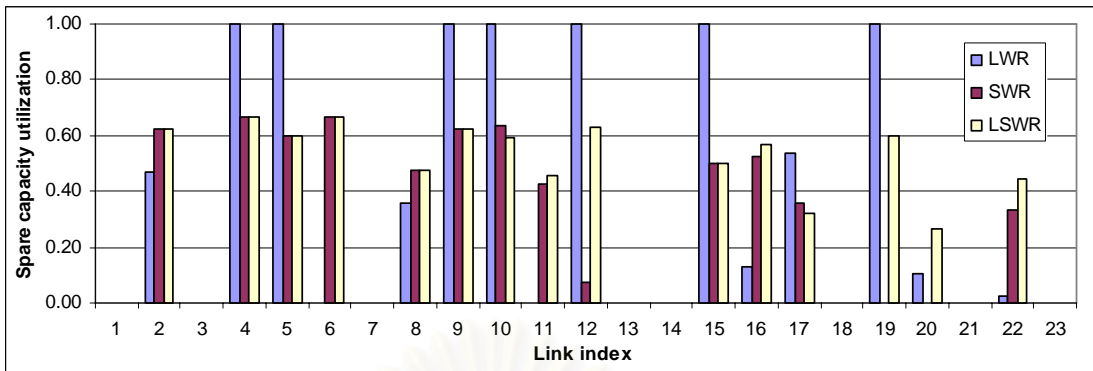
รูปที่ 4.42 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 55



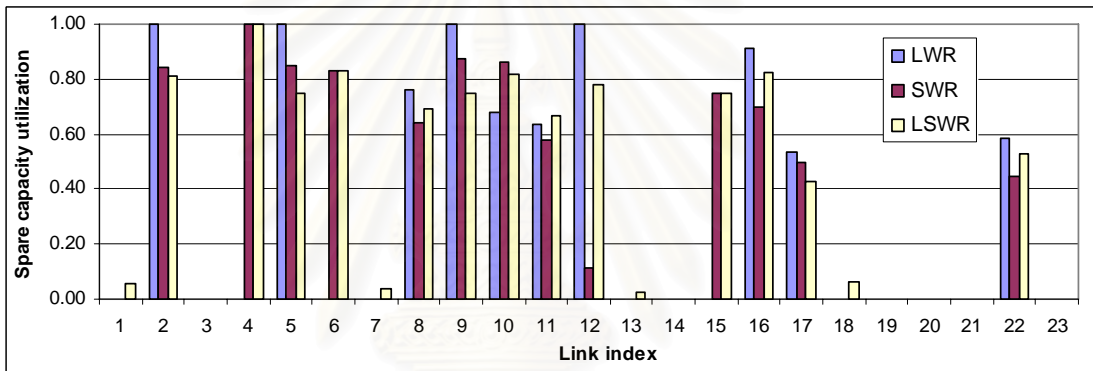
รูปที่ 4.43 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งาน ร้อยละ 70

จากรูปที่ 4.41 ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35 วิธี LWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำที่สุดแสดงว่าสามารถกระจายโหลดได้ดีที่สุด วิธี SWR กระจายโหลดได้น้อยที่สุด ส่วนวิธี LSWR มีความสามารถในการกระจายโหลดอยู่ในระดับกลาง เนื่องจากที่พารามิเตอร์ค่านี้ก่อนเกิดความเสียหายแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีค่าใช้งานค่อนข้างต่ำ วิธี LWR จะเลือกใช้เส้นทางที่มีค่า Busy factor ต่ำจนเต็มก่อนจึงใช้เส้นทางที่มีค่า Busy factor สูงขึ้นไป ทำให้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำถูกใช้ ความจุสำรองอย่างเต็มที่และจำนวนเส้นทางที่ใช้ก็น้อย แต่วิธี LSWR จะพิจารณาค่าการไหลของทุกเส้นทางที่สามารถหาค่าการไหลได้ก่อนการกำหนดสัดส่วนกราฟฟิกเพราะความจุสำรองมีเหลือมากกว่าค่ากราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ดังนั้นในเส้นทางที่มีค่าการไหลสูงขึ้นไปจึงอาจมีข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานสูงถูกใช้ซ้ำ ผลต่างระหว่างค่าใช้งานจึงมีค่ามากซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าการกระจายโหลดให้มีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนในกรณีของวิธี SWR ก็เช่นเดียวกันที่ใช้กลไกการกำหนดกราฟฟิกตามสัดส่วนของค่าการไหลแต่สิ่งที่ทำให้วิธีนี้มีค่าการกระจายโหลดสูงที่สุดก็เนื่องมาจากวิธีนี้ใช้การกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางบูรณะโดยไม่ได้พิจารณาถึงค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายดังเช่นวิธี LSWR และ LWR

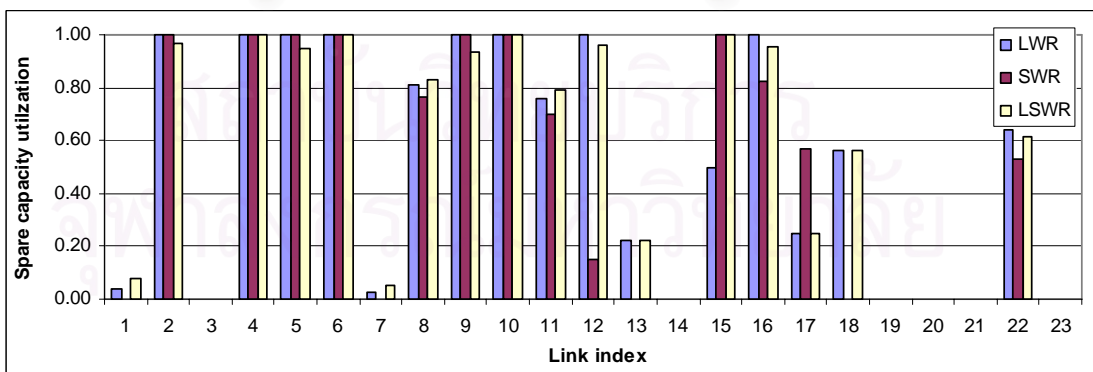
ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55 ในรูปที่ 4.42 ทั้งสามวิธีมีค่าการกระจายโหลดใกล้เคียงกันมากโดยเกือบจะเท่ากันสำหรับวิธี LSWR กับวิธี SWR เนื่องจากเส้นทางบูรณะของทั้งสองวิธีใช้ข่ายเชื่อมโยงเดียวกันเกือบทั้งหมดซึ่งสังเกตได้จากตัวอย่างในรูปที่ 4.44 แต่จะต่างกันที่ปริมาณกราฟฟิกที่จะกำหนดไปยังแต่ละเส้นทาง โดยที่วิธี LSWR ก็ยังได้รับผลจากค่าการไหลที่หาได้จากการเรียงลำดับเส้นทางตามลำดับน้อยไปมากของค่า Busy factor ส่วนวิธี LWR นั้นมีค่าการกระจายโหลดสูงที่สุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายมีค่าค่อนข้างสูง แม้ว่าวิธี LWR จะกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำ แต่กราฟฟิกเหล่านี้จะกระจุกตัวอยู่ที่บางข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น ทำให้ทั้งวิธี LSWR และ SWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่า จากรูปที่ 4.43 ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70 ซึ่งโครงข่ายต้องรองรับกราฟฟิกปริมาณสูง ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายจึงมีค่าสูง ดังนั้นการกำหนดกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำจึงมีความสำคัญมาก ส่งผลให้ทั้งวิธี LWR และวิธี LSWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าวิธี SWR ที่ถึงแม้ว่าจะกระจายกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังหลายๆ ข่ายเชื่อมโยงก็ตาม ส่วนกรณีที่วิธี LSWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าวิธี LWR ก็เนื่องมาจากวิธี LSWR พิจารณาการกำหนดกราฟฟิกตามสัดส่วนของค่าการไหลของแต่ละเส้นทาง ซึ่งเส้นทางเหล่านี้ก็ได้เรียงลำดับตามค่า Busy factor จากน้อยไปมากด้วย ทำให้วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกระจายโหลดดีที่สุดที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานสูง ซึ่งผลกระจายโหลดที่กล่าวมาทั้งหมดจะขอยกตัวอย่างเพื่อการอธิบายให้ชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่แสดงค่าใช้งานความจุสำรองเมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหาย



รูปที่ 4.44 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหายที่ ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35

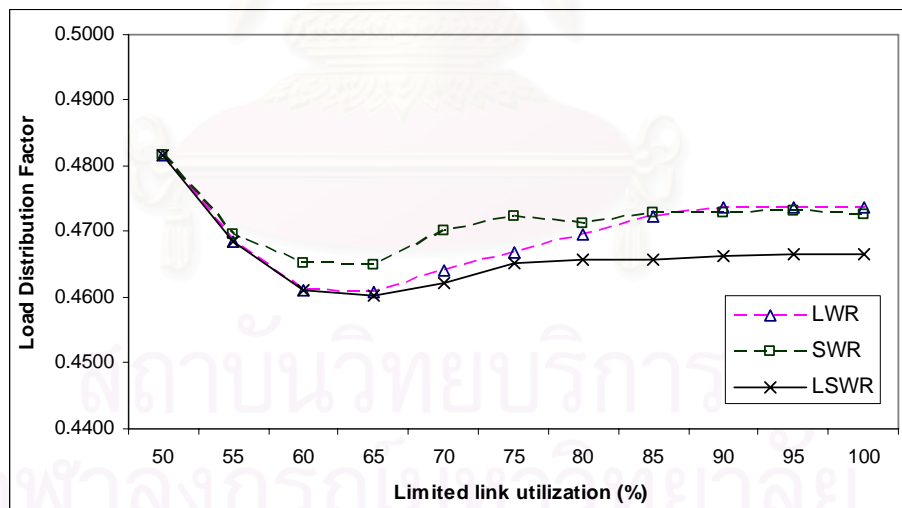


รูปที่ 4.45 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหายที่ ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

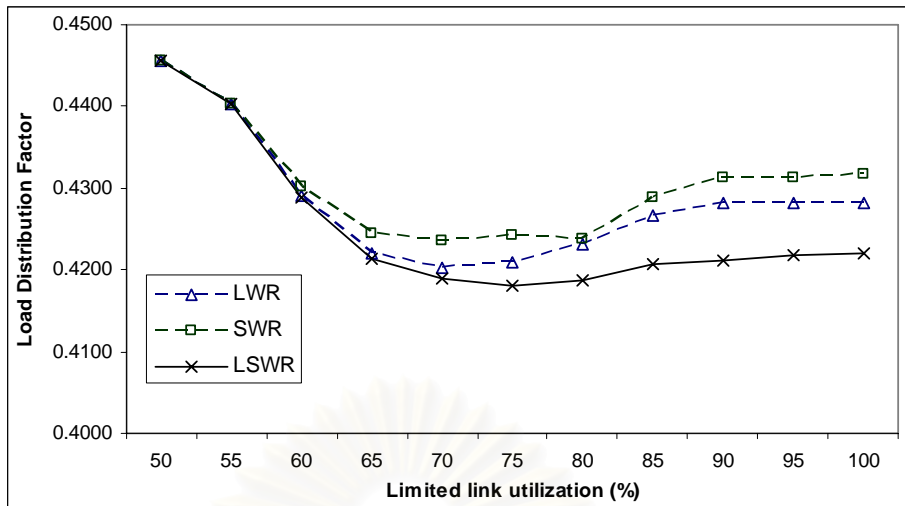


รูปที่ 4.46 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ก) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหายที่ ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้งานความจุสำรองเมื่อข่ายเชื่อมโยง (1, 4) เสียหายจากการใช้วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 35 ในรูปที่ 4.44 พบว่าวิธีการนี้จะไม่ใช้ความจุสำรองในแต่ข่ายเชื่อมโยงจนหมด ซึ่งเห็นได้ว่ามีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ความจุสำรองมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี LWR และจะกระจายทราฟฟิกให้ไปใช้งานข่ายเชื่อมโยงที่หลากหลายเช่นเดียวกับวิธี SWR จากรูปพบว่าแท่งกราฟของค่าใช้งานความจุสำรองสำหรับวิธี LSWR มีความสูงใกล้เคียงกันมากกว่าทั้งสองวิธีที่เหลือ แต่กระบวนการเช่นนี้ก็ไม่ได้ทำให้ค่าการกระจายโหลดต่ำที่สุด เนื่องจากข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำไม่ได้ถูกใช้อย่างเต็มที่ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.41 แต่เมื่อทราฟฟิกในโครงข่ายเพิ่มสูงขึ้น เช่นในรูปที่ 4.45 ที่ปริมาณทราฟฟิกร้อยละ 55 จะเห็นได้ว่าทั้งสามวิธีมีการใช้ความจุสำรองเพิ่มมากกว่าเดิม แต่วิธี LSWR ก็มีกระบวนการลดการใช้ความจุสำรองจนหมดโดยกระจายทราฟฟิกให้มากขึ้น ดังจะเห็นได้จากมีการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยง 1, 7, 13 และ 18 เล็กน้อยเพื่อลดภาระการรองรับทราฟฟิกของข่ายเชื่อมโยงอื่นที่มีค่าใช้งานสูงมากอยู่แล้ว หากว่าปริมาณทราฟฟิกใช้งานในโครงข่ายสูงมาก ดังเช่นในรูปที่ 4.46 ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70 หลายข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ความจุสำรองจนหมดไม่ว่าจะใช้วิธีบูรณะใดก็ตาม แต่วิธี LSWR ก็พยายามเลือกที่จะกำหนดทราฟฟิกไปใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำให้มากขึ้น เช่นที่ข่ายเชื่อมโยง 18 มีค่าใช้งานที่เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.47 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 60



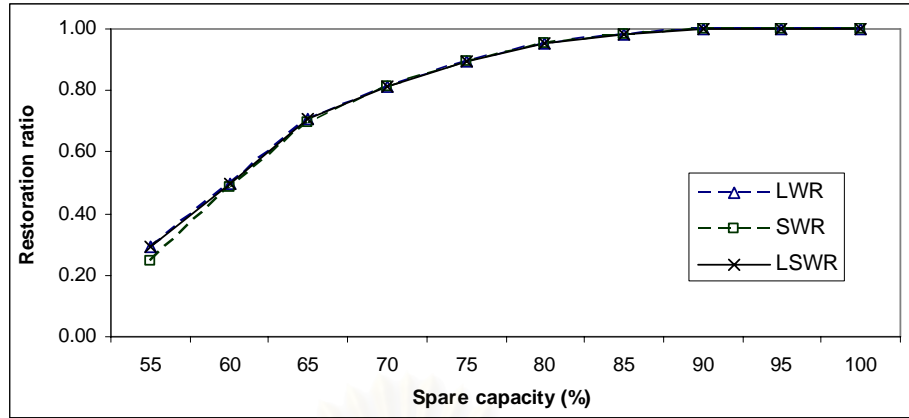
รูปที่ 4.48 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ก) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 70

ในกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานเป็นร้อยละ 60 ในรูปที่ 4.47 ที่การจำกัดค่าใช้งานร้อยละ 50 ทั้งสามวิธีมีค่าการกระจายโหลดเท่ากันเนื่องจากมีปริมาณความจุสำรองให้ใช้งานต่ำมากจึงมีเส้นทางสำรองให้เลือกใช้น้อยมาก ที่การจำกัดค่าใช้งานร้อยละ 55 ถึง 80 วิธี LWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าวิธี SWR เนื่องจากในบางรูปแบบความเสียหายการจำกัดค่าใช้งานในช่วงนี้ทำให้ความจุสำรองที่มีอยู่ไม่เพียงพอสำหรับการบูรณะทราฟฟิกได้ทั้งหมด การกำหนดทราฟฟิกของวิธี SWR จึงเป็นไปตามสมการ (3.13) และ (3.14) การกระจายทราฟฟิกสำหรับรูปแบบความเสียหายนั้นจึงไม่เกิดขึ้น ส่วนที่การจำกัดค่าใช้งานไม่ให้เกิดร้อยละ 80 ถึง 100 พบว่าทั้งวิธี LWR และ SWR มีค่าการกระจายโหลดที่ใกล้เคียงกัน เพราะวิธี LWR ใช้จำนวนเส้นทางบูรณะน้อยลงเนื่องจากมีความจุสำรองในเส้นทางที่อยู่ในอันดับต้นๆ ให้ใช้มากขึ้น ในกรณีที่ทราฟฟิกใช้งานเป็นร้อยละ 70 ในรูปที่ 4.48 พบว่าค่าการกระจายโหลดของทั้งสามวิธีจะแตกต่างกันตั้งแต่การจำกัดค่าใช้งานไม่ให้เกิดร้อยละ 60 ขึ้นไป โดยวิธี SWR มีค่าการกระจายโหลดสูงที่สุด วิธี LWR รองลงมาและวิธี LSWR ต่ำที่สุด ทั้งนี้ก็เพราะว่าวิธี SWR ไม่สามารถใช้กลไกการกระจายทราฟฟิกเมื่อความจุสำรองมีไม่เพียงพอสำหรับการบูรณะทราฟฟิกได้ทั้งหมดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และในกรณีนี้ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานสูงขึ้นประสิทธิภาพการกระจายโหลดของวิธีนี้จึงแยกว่าสองวิธีที่เหลือ สำหรับวิธี LSWR มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าทั้งสองวิธีที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานทั้งสองค่าตั้งแต่การกำหนดค่าใช้งานไม่ให้เกิดร้อยละ 70 ถึง 100 เนื่องจากวิธีนี้พิจารณาทั้งการเลือกเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำและการกระจายทราฟฟิกตามสัดส่วนของค่าการโหลดของเส้นทางบูรณะ

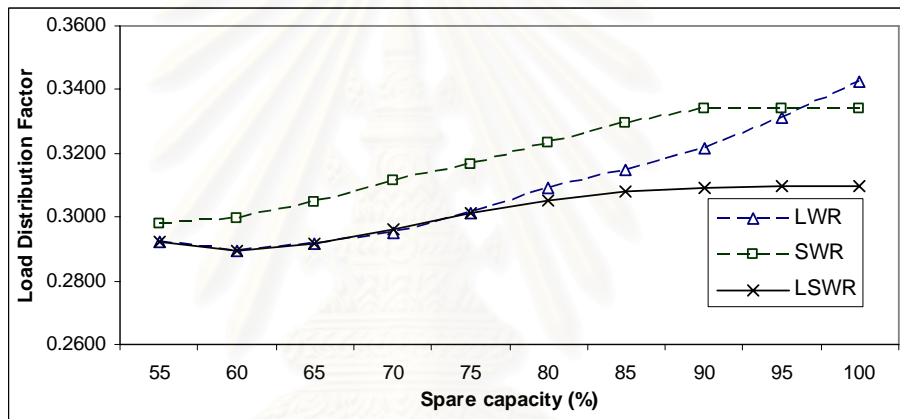
หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.47 และ 4.48 พบว่าวิธี LSWR ก็มีค่าการกระจายโหลดที่ต่ำที่สุดในช่วงการจำกัดค่าใช้งานเดียวกันกับวิธี LWR และ SWR เนื่องจากการสุ่มเส้นทางใช้งานให้ได้ปริมาณกราฟฟิกใช้งานตามที่กำหนด ซึ่งมีผลให้ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายอยู่ในช่วง 0.45-0.65 เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ค่าการกระจายโหลดที่ต่ำที่สุดในช่วงการจำกัดค่าใช้งานใกล้เคียงกับค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหาย และเหตุที่ทั้งสามวิธีมีค่าการกระจายโหลดต่ำลงเมื่อปริมาณกราฟฟิกใช้งานสูงขึ้นก็เนื่องมาจากกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายมีปริมาณมากต้องใช้ความจุสำรองในการบูรณะมากขึ้น จึงมีผลต่อค่าใช้งานและจำนวนข่ายเชื่อมโยงทำให้ค่าใช้งานสูงและใกล้เคียงกันมากขึ้น

4.2.3.2 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ข)

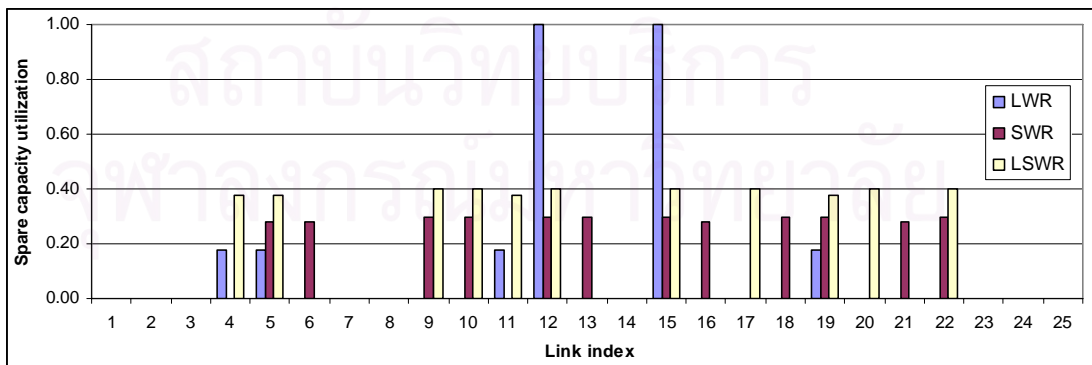
ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบผลดีผลเสียที่ได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งสามวิธีกับโครงข่ายทดสอบ (ข) ที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างจากโครงข่าย (ก) ถึงแม้จะมีค่าการเชื่อมต่อเท่ากันโดยอัตราการบูรณะเฉลี่ยของวิธี LSWR เปรียบเทียบกับวิธี LWR และ SWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.49 จะเห็นได้ว่าสามารถทำได้ดีเท่ากับวิธี LWR ที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 55 ถึง 60 สามารถทำได้ดีกว่าวิธี SWR ในด้านการกระจายโหลดจะเห็นได้จากรูปที่ 4.50 ว่าวิธี LSWR มีประสิทธิภาพการกระจายโหลดที่ดีกว่าวิธี SWR ทุกช่วงความจุสำรองก็เนื่องจากการใช้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำจากการกำหนดค่า Busy factor ทำให้กราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปอยู่บนข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำ แต่ก็มีประสิทธิภาพการกระจายโหลดดีกว่าวิธี LWR ที่ปริมาณความจุสำรองมากกว่าร้อยละ 75 เพราะว่าเมื่อความจุสำรองมีมากพอ กลไกการกำหนดกราฟฟิกตามสัดส่วนของค่าการไหลของแต่ละเส้นทางบูรณะจึงเริ่มทำงานดังจะเห็นได้จากตัวอย่างความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (5, 9) ที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 100 พบว่าวิธี LWR สามารถกระจายกราฟฟิกไปยังข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำแต่ก็ใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยง 12 และ 15 จนหมดซึ่งทำให้โครงข่ายมีความเปราะบาง(Vulnerable) มากขึ้น ส่วนวิธี SWR แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการกระจายโหลดต่ำสุดแต่ก็ไม่ใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงใดจนหมด วิธี LSWR จึงนำเอาข้อดีของทั้งสองวิธีมาใช้ร่วมกันคือใช้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำและกระจายกราฟฟิกตามสัดส่วนของค่าการไหลของแต่ละเส้นทางด้วย ส่งผลให้ค่าใช้งานของแต่ละข่ายเชื่อมโยงใกล้เคียงกันมากขึ้น ส่วนเหตุที่วิธี LWR มีค่าการกระจายโหลดสูงกว่าวิธี SWR ที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 100 เพราะวิธี LWR เลือกใช้เส้นทางในอันดับต้นๆ ที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำเท่านั้น ซึ่งเพียงพอที่จะรองรับกราฟฟิกทั้งหมด ทำให้ข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ในเส้นทางดังกล่าวถูกใช้ความจุสำรองจนหมดเช่นข่ายเชื่อมโยง 12 และ 15 ในรูปที่ 4.51 การกระจายตัวของกราฟฟิกจึงไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 4.49 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ข) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



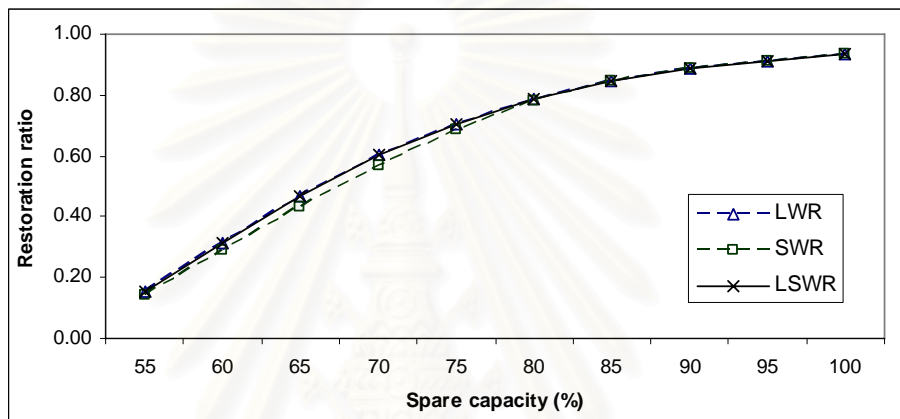
รูปที่ 4.50 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ข) วิธี LSWR ที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



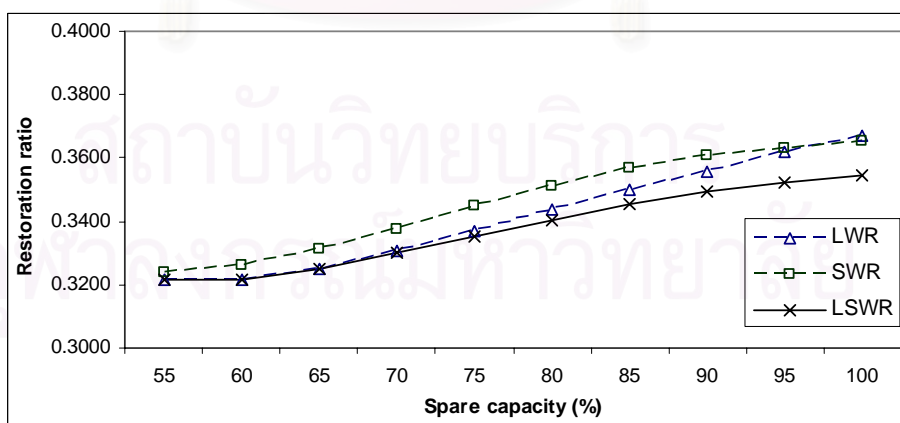
รูปที่ 4.51 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (5, 9) เสียหายที่ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

4.2.3.3 ผลการทดสอบโดยใช้โครงข่ายทดสอบ (ค)

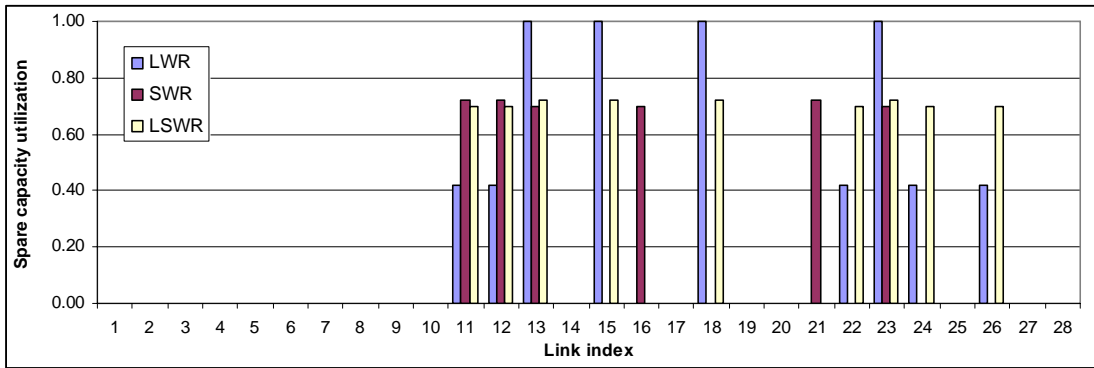
หลังจากทดสอบกับโครงข่ายที่มีค่าการเชื่อมต่อสูงแล้ว ในส่วนนี้จะทดสอบกับโครงข่าย (ค) ที่มีค่าการเชื่อมต่อต่ำเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกระจายโหลดของวิธี LSWR เปรียบเทียบกับทั้งสองวิธีที่นำเสนอก่อนหน้านี้ ซึ่งประสิทธิภาพของอัตราการบูรณะเฉลี่ยที่ได้ก็มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี SWR ดังแสดงในรูปที่ 4.52 แต่ก็ไม่สามารถทำให้อัตราการบูรณะเป็น 1.00 ได้แม้ว่าปริมาณความจุสำรองจะเป็นร้อยละ 100 ก็เนื่องจากลักษณะเฉพาะของโครงข่ายที่มีค่าการเชื่อมต่อต่ำและไม่ได้ออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายอย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.52 อัตราการบูรณะเฉลี่ยของโครงข่าย (ค) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.53 ค่าการกระจายโหลดของโครงข่าย (ค) วิธี LSWR ที่ปริมาณกราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55



รูปที่ 4.54 ค่าใช้งานความจุสำรองโครงข่าย (ข) วิธี LSWR เมื่อข่ายเชื่อมโยง (6, 12) เสียหายที่ ปริมาณทราฟฟิกใช้งานร้อยละ 55

เมื่อพิจารณาการกระจายโหลดของวิธี LSWR สามารถทำได้ดีกว่าวิธี SWR ตลอดช่วงการปรับเปลี่ยนปริมาณความจุสำรองดังแสดงในรูปที่ 4.53 ก็เนื่องจากวิธีนี้เลือกเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำมาเป็นเส้นทางสำรอง แต่จะดีกว่าวิธี LWR เมื่อปริมาณความจุสำรองมีมากกว่าร้อยละ 75 เพราะบางรูปแบบความเสียหายสามารถบูรณะทราฟฟิกได้ทั้งหมด กลไกการกำหนดทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังเส้นทางสำรองตามสัดส่วนค่าการไหลที่ได้จึงเริ่มทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.54 จะเห็นว่าวิธี LSWR เลือกที่จะใช้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหายต่ำ เช่น 13, 15 และ 18 อีกทั้งไม่เลือกใช้งานหมดโดยกระจายทราฟฟิกบางส่วนให้ไปใช้ข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ด้วย

ส่วนกรณีที่วิธี LWR มีค่าการกระจายโหลดใกล้เคียงกับวิธี SWR ที่ปริมาณความจุสำรองร้อยละ 95 ถึง 100 ก็เพราะว่าวิธี LWR ใช้เส้นทางในการรองรับทราฟฟิกน้อยลง เส้นทางในอันดับต้นๆ จะมีข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ความจุสำรองจนหมดเช่นข่ายเชื่อมโยง 13, 15, 18 และ 23 ดังแสดงในรูปที่ 4.54 แต่วิธี SWR จะมีทางเลือกสำหรับกระจายทราฟฟิกมากขึ้น เหตุผลดังกล่าวจึงเป็นการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างทั้งสองวิธีนี้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาค่าการกระจายกราฟฟิกของการบูรณะแบบวางแผนระดับข่ายเชื่อมโยง สำหรับความเสียหายแบบหนึ่งข่ายเชื่อมโยงใดๆที่ไม่เกิดขึ้นพร้อมกัน วิธีที่นำเสนอนี้เป็นการออกแบบวิธีการบูรณะโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายของข่ายเชื่อมโยงที่จะถูกใช้เป็นเส้นทางบูรณะ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามวิธีคือ

- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด (LWR) จะกระจายกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายของข่ายเชื่อมโยงต่ำให้มากที่สุด
- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง (SWR) วิธีนี้จะกำหนดกราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ของแต่ละเส้นทาง
- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง (LSWR) วิธีนี้เป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีการข้างต้นเข้าด้วยกันคือการกระจายโหลดและการใช้ความจุสำรองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะกระจายกราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายของข่ายเชื่อมโยงต่ำที่สุดและสัดส่วนของกราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางนั้นก็จะเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ด้วย

และได้ออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่พิจารณาถึงหลักการกระจายโหลดเพื่อแสดงถึงผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อบอกประสิทธิภาพด้านการกระจายโหลดของการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงภายหลังจากทำการเชื่อมต่อกราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายเรียบร้อยแล้ว จากผลการทดสอบในบทที่ 4 สามารถสรุปได้ว่า

1. การบูรณะด้วยวิธี LWR SWR และ LSWR สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ด้านการกระจายโหลดคือมีประสิทธิภาพด้านการกระจายโหลดดีกว่าวิธี SP ไม่ว่าคุณลักษณะของโครงข่ายจะเป็นเช่นใดก็ตาม

2. ผลที่ได้จากการกระจายโหลดส่งผลให้ในบางรูปแบบความเสียหายที่ใช้การบูรณะวิธี LWR และ LSWR มีค่าอัตราการบูรณะสูงกว่าการใช้วิธีบูรณะแบบ SP ส่งผลให้อัตราการบูรณะเฉลี่ยสูงขึ้นด้วย
3. วิธี LWR สามารถเลือกใช้เส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำในการรองรับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายเพื่อลดการใช้งานข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานสูงอยู่แล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในกรณีที่มีปริมาณทราฟฟิกใช้งานในโครงข่ายมีค่าต่ำเช่นที่มีปริมาณทราฟฟิกใช้งาน 35 เปอร์เซ็นต์ เพราะทำให้ข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำอยู่แล้วถูกเลือกใช้มากขึ้น
4. วิธี SWR สามารถกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามสัดส่วนค่าการไหลของแต่ละเส้นทางบูรณะได้อย่างเหมาะสม ซึ่งช่วยลดการใช้ความจุสำรองในข่ายเชื่อมโยงจนหมดได้ วิธีนี้จึงเหมาะกับกรณีที่ความจุสำรองในโครงข่ายมีมากเพียงพอที่จะสามารถรับประกันอัตราการบูรณะได้ทั้งหมด นั่นคือโครงข่ายต้องได้รับการออกแบบความจุมาอย่างเหมาะสม
5. วิธี LSWR ได้นำข้อดีของวิธี LWR และ SWR มาใช้ได้อย่างเหมาะสมคือสามารถกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงต่ำ อีกทั้งในกรณีที่ผลรวมการไหลมากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ปริมาณทราฟฟิกที่กำหนดไปก็ยังเป็นสัดส่วนกับค่าการไหลของแต่ละเส้นทางด้วย วิธีนี้จึงเหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่มีปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายอยู่ในระดับกลางถึงระดับสูง
6. เนื่องจากหลักการกระจายทราฟฟิกที่ได้นำเสนอทำให้วิธี LWR และ LSWR ใช้เส้นทางบูรณะที่มีความยาวช่วงเชื่อมต่อเฉลี่ยมากกว่าวิธี SP ส่วนวิธี SWR จะใช้เส้นทางบูรณะที่มีความยาวช่วงเชื่อมต่อเฉลี่ยมากกว่าวิธี SP ก็ต่อเมื่อรูปแบบความเสียหายนั้นมีผลรวมการไหลของชุดเส้นทางบูรณะมากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ
7. แม้ว่าวิธีการทั้งสามแบบจะใช้ความจุสำรองในโครงข่ายมากขึ้นกว่าวิธี SP แต่การกระจายโหลดที่ได้มีข้อดีคือช่วยลดความเปราะบางของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานสูงอยู่แล้วไม่ให้ถูกใช้ความจุจนเต็มหรือมีค่าใช้งานเป็น 1 ซึ่งสามารถลดโอกาสการเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้
8. ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ออกแบบสามารถแสดงผลตามวัตถุประสงค์ได้อย่างชัดเจนสำหรับการเปรียบเทียบภายในสภาวะโครงข่ายเดียวกัน วิธีการที่มีค่าการกระจาย

โหลดต่ำกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกระจายโหลดดีกว่าวิธีที่มีค่าการกระจายโหลดสูง ซึ่งสามารถเห็นได้จากการเปรียบเทียบกับตัวอย่างของค่าใช้งานความจุสำรองสำหรับแต่ละรูปแบบความเสียหายที่ปริมาณกราฟฟิกร์ใช้งานค่าต่างๆ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาในขั้นถัดไป

1. ในการจำลองแบบของวิธีการบูรณะที่นำเสนอ นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้การกระจายกราฟฟิกร์ที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบูรณะแบบหาเส้นทางสั้นที่สุดและการไหลที่มากที่สุด ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับการออกแบบโครงข่ายในการวางความจุใช้งานและความจุสำรองเพื่อลดค่าใช้จ่ายให้น้อยที่สุดด้วยการใช้ความจุสำรองร่วมกันให้มากขึ้นได้
2. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการบูรณะความเสียหายโครงข่ายระดับข่ายเชื่อมโยงซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการบูรณะความเสียหายในรูปแบบดังกล่าว ในด้านการย้อนระดับ (Loop back) ของเส้นทางใช้งานหลังการบูรณะความเสียหาย นั่นคือเส้นทางใช้งานอาจจะผ่านข่ายเชื่อมโยงเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้งภายหลังจากการบูรณะความเสียหาย ทำให้สิ้นเปลืองความจุสำรองในโครงข่าย ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาในงานวิจัยขั้นถัดไปควรจะหาวิธีการบูรณะความเสียหายที่แก้ปัญหาที่กล่าวนี้โดยการสร้างแบบจำลองใหม่ที่เหมาะสมได้

รายการอ้างอิง

- [1] A. Zolfaghari, and F.J. Kaudel. Framework for Network Survivability Performance. IEEE Journal. vol.12 (January 1994): 46-51.
- [2] W. D. Grover. Mesh-Based Survivable Networks Option and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking. Prentice Hall PTR, 2003.
- [3] Y. Liu, and K. S. Trivedi. A General Framework for Network Survivability Quantification. 12th GI/ITG Conference on Measuring, Modeling and Evaluation of Computer and Communication Systems. (2003)
- [4] T1A1.2 Working Group on Network Survivability Performance. Technical report on Performance and Signal processing. Technical report. (November 2000)
- [5] D. Zhou, and S. Subramaniam. Survivability in Optical Networks. IEEE Network. (November/December 2000): 16-23.
- [6] Y. Xiong, and L. Mason. Restoration strategies and Spare Capacity Requirements in Self-Healing ATM Network. IEEE proc. INFOCOM'97. (April 1997): 353-360.
- [7] M. Patel, R. Chandrasekaran, and S. Venkatesan. A comparative study of restoration schemes and spare capacity assignments in mesh networks. Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Computer Communications and Networks. (October 2003)
- [8] J. Doucette, and W.D. Grover. Comparison of Mesh Protection and Restoration Schemes and the Dependency on Graph Connectivity. 3rd International Workshop on Design of Reliable Communication Networks. (October 2001): 121-128.
- [9] D. Jungnickel. Graphs, Networks and Algorithms (algorithms and Computation in Mathematics). 171-186. Springer.

- [10] C. Saivichit, J.A. Barria, and L.F. Turner. Topological Clusterisation for Fault Management in Large Telecommunication Networks. IEEE 2003. (2003): 1047-1051.
- [11] A. Giorgetti, L. Valcarengi, and P. Casoldi. Single-Layer Versus Multilayer Preplanned Lightpath Restoration. IEEE Journal of lightwave technology. Vol. 23 no. 10 (October 2005)
- [12] L. Valcarengi, and A. Giorgetti. Implement Stochastic Preplanned Restoration with Proportional Weighted Path Choice in IP/GMPLS/WDM Networks. Photonic Network Communications. (2002): 285-295.
- [13] R. Shenai, C. Maiciocco, M. Mishra and K. Sivalingam. Threshold based Selective Link Restoration for Optical WDM Mesh Network. IEEE Design of Reliable Communication Networks (DRCN) 2003, Banff, Alberta, Canada. (October 2003): 31-38.
- [14] R. Shenai, and K. Sivalingam. Hybrid Survivability Approaches for Optical WDM Mesh Network. IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol.23 no. 10 (October 2005): 3046-3055.
- [15] C. Saivichit. Network Reconfiguration Algorithm for Overcoming Faults arising in Networks. Ph.D. thesis University of London. (May 2001)
- [16] M. Herzberg, S.J. Bye, and A. Utano. Hop-limit approach for spare-capacity assignment in survivable networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. Vol. 3 no. 6 (December 1995): 775-784.
- [17] H. Sakauchi, Y. Nishimura, and S. Hasegawa. A Self-healing Network with an Economical Spare-channel Assignment. IEEE GLOBECOM '90. Vol. 1 (December 1990): 438-443.

- [18] H. Saito, Y. Miyao, T. Komine, and F. Kubota. Joint capacity assignment to state independent working and spare paths for enhanced network survivability. IEEE conf. Communication. (June 1998): 1743-1748.
- [19] C. -C. Shyur, T. -C. Lu, and U. -P. Wen. Applying Tabu Search to Spare Capacity Planning for Network Restoration. Computers & Operations Research. (October 1999): 1175-1194..
- [20] F. Yegenoglu, and E. Sherk. Network Characterization Using Constraint-Based Definitions of Capacity, Utilization, and Efficiency. IEEE Communication Magazine. (September 2005): 132-138.
- [21] K. Murakami, and H.S. Kim. Optimal Capacity and Flow Assignment for Self-Healing ATM Network Based on Line and End-to-End Restoration. IEEE/ACM Trans on Networking. (April 1998): 207-221
- [22] L. Ruan, H. Luo, and C. Liu. Dynamic Routing Algorithm with Load Balancing Heuristics for Restorable Connections in WDM Networks. IEEE Journal on selected areas in communications. Vol. 22 no.9 (November 2004)
- [23] K. Gopalan, T. Chiueh, and Y. J. Lin. Load balancing Routing with Bandwidth-Delay Guarantees. IEEE Communication Magazine. (June 2004): 108-113.
- [24] H. Lee, S.B. Kim, and Y. Go. Modeling and algorithms for physical layer network survivability. IEEE 1995 (1995): 161-166.
- [25] A.Z. Fahad, P.A. Jayasumana, and A.H. Jahangir. Network Survivability performance evaluation with applications in WDM networks with wavelength conversion. Proceedings – Conference on Local Computer Networks, LCN, Proceedings – 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004. (2004): 344-351.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อัลกอริทึม Modified Depth First Search

ในภาคผนวก ก นี้ได้แสดงอัลกอริทึม Modified Depth First Search ซึ่งใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคูโนดที่ต้องการ โดยได้อ้างอิงมาจาก [17] ดังนี้

อัลกอริทึมนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ค้นหาเส้นทางจากโนด v ที่เราพิจารณาไปยังทุกโนดที่อยู่ข้างเคียง ($Neb(v)$) โดยยกเว้นเส้นทาง $[x, Neb(v)]$ กระบวนการของอัลกอริทึมเริ่มต้นจากกำหนดให้โนด v เป็น root node จากนั้นจึงเริ่มค้นหาเส้นทาง และจะหยุดการค้นหาเมื่อพบโนดที่เป็นสมาชิกของ $Neb(v)$

กำหนด $(v, u, x) \in N$

ขั้นที่ 1 เลือก v จาก N

กำหนดให้ v เป็น root node ($v = n_0$);

และ $n_1 = \{Neb(v)\}$;

ขั้นที่ 2 เลือก u จาก n_1 ,

If ($index(u) > index(n_0)$)

ไปขั้นที่ 3;

Else

ไปขั้นที่ 2 แล้วเลือก u ตัวใหม่;

ขั้นที่ 3

if มีสมาชิกของ n_1 ที่ถูกกำกับไว้ (Mark) then

Do Mark u โดยที่ $u \in Neb(v)$;

บันทึกค่า u ในรายการเส้นทางชั่วคราว (Temporary path list);

เลือก x จาก $Neb(u)$ และบันทึกค่า x ในรายการเส้นทางชั่วคราว;

Until

ไปขั้นที่ 4;

Else

ขั้นที่ 4

ไปขั้นที่ 5;

if $x \in Neb(v)$ และโนด x ยังพร้อมใช้งาน

บันทึกเส้นทางดังกล่าวในรายการเส้นทางถาวร (Permanent path list);

และบันทึกรายการเส้นทางถาวรล่าสุดในรายการเส้นทางชั่วคราว;

ค้นหาโนดที่เชื่อมต่อถัดไป;

บันทึกโนดดังกล่าวในรายการเส้นทางชั่วคราว จนกระทั่งพบโนดที่เป็นสมาชิกของ $Neb(v)$;

ไปขั้นที่ 4;

Else ถ้าโนดดังกล่าวบันทึกไว้ในรายการเส้นทางชั่วคราวแล้ว;

ย้อนกลับไปยังระดับ (โนดที่อยู่ก่อนหน้า) และค้นหาเส้นทางใหม่;

บันทึกโนดดังกล่าวในรายการเส้นทางชั่วคราว จนกระทั่งพบโนดที่เป็นสมาชิกของ $Neb(v)$;

ขั้นที่ 5

ไปขั้นที่ 4;

Else ถ้าการค้นหาย้อนกลับไปยังระดับแรก

ไปเริ่มต้นยัง Root node; ทำขั้นที่ 3;

และเลือก x ค่าใหม่

If ทุกโนดใน N ถูกกำหนดเป็น root node ทั้งหมดแล้ว

End;

Else

เปลี่ยนค่าเป็น $n_0, n_1 = \emptyset$

ไปขั้นที่ 1 สำหรับ root node ถัดไป

ภาคผนวก ข

อัลกอริทึม MKM

ภาคผนวก ข นี้ได้แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่าไหลสำหรับชุดของเส้นทางที่มีความยาวช่วงเชื่อมต่อกันที่มีชื่อว่า อัลกอริทึม MKM โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

กำหนด $N = (G, c, s, t)$ เป็น Layered flow network ที่มีค่าความจุเป็นบวก มีโนดต้นทางเป็น s และโนดปลายทางเป็น t

$G = (V, E)$ เป็นชุดของกราฟที่กำหนดค่าความจุของข่ายเชื่อมโยง e เป็น $c(e)$

$p^-(v)$ และ $p^+(v)$ คือค่าการไหลที่ออกและเข้าโนด v ตามลำดับ

Begin

For $e \in E$ do $g(e) \leftarrow 0$;

For $v \in V$ do

If $v = t$ then $p^-(v) \leftarrow \infty$ else $p^-(v) \leftarrow \sum_{e^- = v} c(e)$;

If $v = s$ then $p^+(v) \leftarrow \infty$ else $p^+(v) \leftarrow \sum_{e^+ = v} c(e)$;

Repeat

For $v \in V$ do $p^+(v) \leftarrow \min\{p^+(v), p^-(v)\}$;

เลือกค่าที่ต่ำที่สุดของ w ;

PUSH($w, p(w)$);

PULL($w, p(w)$);

While there exist v with $p^+(v) = 0$ or $p^-(v) = 0$ do

For $e \in \{e \in E : e^- = v\}$

$u \leftarrow e^+$, $p^+(u) \leftarrow p^+(u) - c(e)$;

Remove e from E

For $e \in \{e \in E : e^+ = v\}$

$u \leftarrow e^-$, $p^-(u) \leftarrow p^-(u) - c(e)$;

Remove e from E

Remove v from V

Until $s \notin V$ or $t \notin V$

End;

Subalgorithm *PUSH*(y, k)

กำหนดให้ Q เป็นชุดคิวที่มีองค์ประกอบหนึ่งตัวคือ y ;

Begin

For $u \in V$ do $b(u) \leftarrow 0$; $b(y) \leftarrow k$;

Repeat

 ถ้าจัดองค์ประกอบตัวแรกคือ v ออกจาก Q ;

 While $v \neq t$ and $b(v) \neq 0$ do

 Choose an edge $e = vu$;

$m \leftarrow \min\{c(e), b(v)\}$;

$c(e) \leftarrow c(e) - m$, $g(e) \leftarrow g(e) + m$;

$p^+(u) \leftarrow p^+(u) - m$, $b(u) \leftarrow b(u) + m$;

$p^-(u) \leftarrow p^-(u) - m$, $b(u) \leftarrow b(u) - m$;

 Append u to Q ;

 If $c(e) = 0$ remove e from E ;

Until $Q = \emptyset$

End.

Subalgorithm $PULL(y, k)$

 กระบวนการย่อย “ $PULL$ ” สามารถนิยามได้ในทำนองเดียวกับกระบวนการย่อย
 “ $PUSH$ ” โดยที่ “ $PULL$ ” ใช้สำหรับดึงการไหลของค่า $p(w)$ ไปยัง s .

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. T. Krairiksh, and C. Saivichit. Network Restoration Utilizing Load Distribution Factor as Survivability Performance Index. International Symposium on Communications and Information Technologies 2006. (ISCIT 2006)
2. T. Krairiksh, and C. Saivichit. Novel Performance Index based on Load Distribution Factor Restoration Scheme. 29th Electrical Engineering Conference. (EECON29)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Network Restoration Utilizing Load Distribution Factor as Survivability Performance Index

Thirawat Krairiksh and Chaiyachet Saivichit

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand
Phone +66-2-2186907, Fax +66-2-2186912
E-mail Chaiyachet.S@Chula.ac.th

Abstract— In an event of failure, Network survivability performance could be demonstrated through restoration. Link restoration is the simplest restoration technique provided by determining paths around a failed link. Our aim is to represent the load distribution level with appropriate values. Therefore, we propose a novel performance index scheme for evaluating how well the restoration scheme can distribute the disrupted traffic among restoration paths. A modified restoration scheme is proposed in order to consider load distribution in path computation by using link restoration technique. Experimental results show that our proposed index forms a good representation of survivability value. By using our proposed restoration scheme, the network load distribution is improved, compared with the shortest path scheme. The outcome of the restoration ratio are also improved equally well when traffic demands are increased or spare capacities is insufficient.

I. INTRODUCTION

Survivability is an important factor in the design and evaluation of telecommunication networks. Due to the high capacity of the transmission facilities, a single failure may result in a serious consequence of service disruption. With an increase of traffic demand, specifications of survivability performance are desirable. By considering survivability performance objectives, it will ensure that, under given failure scenarios, network performance will not degrade below predetermined levels.

The term survivability itself is not usually given quantitative meaning but is used in general to refer to the quality of being able to keep on functioning in the event of failure. However, there are many ways to characterize network survivability and define survivability measurements. Using survivability measurements, one can formulate models and then define relevant measures such as traffic survivability ratio, service connectivity ratio, average network downtime, *etc.*, that can be used to estimate the survivability performance of a real or network [1]. In [2], the physical survivability for demand pair which is the ratio of the survived capacity to the working capacity for the demand pair was presented. This model concentrates on mathematical and computational methods to evaluate and improve the survivability and spare capacity allocation. In [3], an analytical technique was proposed to evaluate the Excess Loss due to failure of the network assuming link i has failed,

($ELF(i)$), which is defined as fraction of traffic on the link that is not restored after failure. From [4], failures normally affect the performance of other components around the failed vicinity. Then, the novel quantification method, namely Degree of Disturbance (DoD), was proposed to model the effect of various failure scenarios. This takes into account the effect of failure in nodes and links on the affected demand.

In aspect of load balancing, the extent of load balancing in network [5], $cost(G)$, represents the squared magnitude of the distance vector between the actual and minimum link capacity in network G . A smaller value of $cost(G)$ represents a higher degree of load balancing. In addition, they proposed routing algorithm to select working and backup path which can maintain a high degree of load balance and resource usage efficiency across the network.

The key idea of the proposed model is to consider load distribution in path computation. In other words, it distributes the disrupted traffic among all restoration path, i.e. lighter-loaded links are preferred over heavier-loaded links when routing the restoration paths by using link restoration base. The benefits of considering load distribution in path computation can be seen from [6]. In this paper we firstly propose a novel performance index, Load Distribution Factor (LDF), to show how the restoration scheme can distribute the disrupted traffic among restoration paths, in case of single link failure. Therefore, the link restoration scheme is proposed to improve the survivability of network with consideration of link utilization and available spare capacity.

The rest of this paper is organized as follows. We describe the analysis of survivability and link restoration scheme in section 2. We provide the proposed definition in Section 3. The simulation result and performance comparison between our proposed algorithm and other algorithm are presented in Section 4. Finally, we conclude this paper in section 5.

II. THEORETICAL BACKGROUND

A. Analysis of survivability

The survivability of network is comprised of two parts [1]:

i) the ability of network to maintain or restore an acceptable level of performance during network failures by applying various restoration techniques.

ii) the mitigation or prevention of service outages from network failures by applying preventative techniques.

A good network must be designed to provide some resource redundancy. The appropriate spare capacity must be justified to cope with the predetermined sets of failure scenarios. Once a failure occurs, network must be able to respond with a plausible action which minimizes several undesirable effects. The two basic approaches [7] for the survivability analysis and the development of performance measures are shown as follow:

Given occurrence of failure (GOF): In this approach, each relevant failure scenario is first postulated to have occurred. Then an assessment of survivability is made.

Random occurrence of failure (ROF): This model is usually based on the assumption that failures can be characterized by random variables with given probability distribution functions.

B. Link Restoration

Generally, full services that are robust to failure are extremely desirable. So, in the event of failure, the way to improve network survivability is by restoration. The interrupted traffic must be rerouted via restoration paths. The existing restoration techniques can be classified as path restoration and link restoration. Path restoration restores the end-to-end channel whereas link restoration restores all affected traffic carried by a failed link facility, as shown in Fig. 1. Compared with link restoration, path restoration needs less network resource but computationally hard and complex. Link restoration is very efficient, fast and scalable. For these reasons, link restoration is selected instead of path restoration.

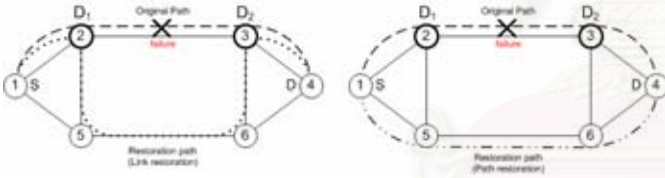


Fig. 1. Link restoration vs. Path restoration

The link restoration scheme with topological cluterisation was proposed in [4], [8]. It uses shortest paths algorithm and maximum flow algorithm to find all possible paths for restoration process and flow between the nodes connected to failure. So, the reconfigured subnetworks can be found. Each subnetwork represented a set of network resources that is sufficient for the restoration of any failed link for each failure scenario. The algorithm obtains the set of nodes and links which is the minimum amount of resources required for the desired restoration level.

III. PROPOSED MODEL

A. Network model

Given the failure of link l^* , the network model and the parameters utilized by the proposed model are presented.

$G(V, E)$ is the graph modeling the physical network with a set of $|V|$ nodes and $|E|$ links;

P_h^* is the set of all possible paths p with h hop limit between the connected nodes of failed link l^* ;

$R^* = \{r_1, \dots, r_k\}$ is the set of k restoration paths due to failure of link l^* ;

$L_{r,i}^* = \{l_1, \dots, l_n\}$ is the set of link in restoration path r_i ;

wc_l is the working capacity of link l ;

sc_l is the spare capacity of link l ;

w_r^* is the weight of path r_i ;

Ω^* is the disrupted traffic of link l^* ;

$\Omega_{r,i}^*$ is the disrupted traffic that should be assigned to restoration path r_i ;

F_R^* is the cumulative maximum feasible flow of all restoration paths;

$f_{r,i}^*$ is the maximum feasible flow of path r_i due to failure of link l^* ;

B. Proposed restoration scheme

The Load and Spare capacity Weighted Restoration scheme (LSWR), is proposed with the objective of balancing the network traffic load and minimizing the error between the fraction of disrupted traffic assigned to each restoration path and the path selection probabilities that are computed to minimize resource contention. The proposed algorithm can be classified in two phases.

B1. Preplanned phase

To begin with, all possible paths with h hop limit, P_h^* , between the connected nodes of link l^* will be preplanned. The Busy factor of each path p , B_p^* , are computed as follows:

$$B_p^* = \max_{\forall l \in p} \left(\frac{\rho_l}{wc_l + sc_l} \right) \quad (1)$$

where ρ_l is capacity utilized by working traffic.

Then, sort the restoration path into the value of Busy factor in increasing order (i.e. minimum to maximum). Next, find the maximum feasible flow of each ordered paths (f_p^*) above by using MKM Algorithm [4], [9] and record the orders path that $f_p^* > 0$ as restoration paths set (R^*), so,

the cumulative maximum feasible flow can be calculated as follows:

$$F_R^{l^*} = \sum_{i=1}^k f_{r,i}^{l^*} \quad (2)$$

The weights for each path $r_i \in R^{l^*}$ are assigned as follows:

$$w_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*} \quad (3)$$

Finally, the probability of choosing path r_i to carry the restored traffic is then computed using the following formula:

$$\Pr_{r,i}^{l^*} = \frac{w_{r,i}^{l^*}}{\sum_{i=1}^k w_{r,i}^{l^*}} \quad (4)$$

B2. Restoration phase

Firstly, the Square Euclidean distance is introduced here to minimize the error between the fraction of disrupted traffic assigned to each restoration path and the path selection probabilities. It can be calculated by a well known equation (5).

$$D^{l^*} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{l^*}}{\Omega^{l^*}} - \Pr_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (5)$$

The disrupted traffic that is assigned to each restoration path can be computed as follows:

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{l^*} = \Omega^{l^*} \quad (6)$$

$$\Omega_{r,i}^{l^*} \leq f_{r,i}^{l^*} \quad (7)$$

From (5), there are many possible assignments of the disrupted traffic to the k restoration paths. Therefore, we will be used the iterative computation [10] to get the optimum traffic assignment. Assuming that a set of N channels is disrupted by the failure of link l^* ($\Omega^{l^*} = N$) at a specific iteration n overall N iterations, one channel of disrupted traffic is assigned so that the distance D^{n,l^*} , computed after iteration, is minimal.

$$D^{n,l^*} = \min_{j \in \{1, \dots, k\}} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{n-1,l^*} + \delta_j}{n} - \Pr_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (8)$$

where δ_j is a binary variable that is equal to 1 if and 0 otherwise, and $\Omega_{r,i}^{n-1,l^*}$ is the number of disrupted traffic assigned to subset i until iteration $n-1$. So, the constraint in (6), (7) becomes

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{n,l^*} = n \quad (9)$$

$$\Omega_{r,i}^{N,l^*} \leq f_{r,i}^{l^*} \quad (10)$$

for each iteration n and specific link l^* failure

In case of the cumulative maximum feasible flow less than or equal to the disrupted traffic ($F_R^{l^*} \leq \Omega^{l^*}$), the disrupted traffic that should be assigned to restoration path r_i become

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{l^*} = F_R^{l^*} \quad (11)$$

$$\Omega_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*} \quad (12)$$

C. Novel performance index

As explained, each restoration scheme has its own advantages and disadvantages. So, the use of different restoration schemes impact on the network performance in different way. The performance index is used as an indicator that can show whether the selected restoration scheme is suitable for that particular network or not.

Restorability or restoration ratio is the most basic indication of survivability because it directly reflects the extent to which single point of failure has been removed. As most commonly used the restorability is defined as the ratio between working units that are restored and the disrupted traffic [11]. For a failure of link l^* , the restorability is

$$R^{l^*} = \frac{T^{l^*}}{\Omega^{l^*}} \quad (11)$$

where T^{l^*} is the number of traffic that can be restored. Then, the network restorability is defined as the average restorability of all working paths that are failed under each single-link failure scenario. That is

$$R_N = \frac{\sum_{\forall l^* \in E} T^{l^*}}{\sum_{\forall l^* \in E} \Omega^{l^*}} = \frac{\sum_{\forall l^* \in E} R^{l^*} \cdot \Omega^{l^*}}{\sum_{\forall l^* \in E} \Omega^{l^*}} \quad (12)$$

In this paper, link utilization is defined as a ratio of the traffic carried by the link after the disrupted traffic is restored to the link capacity. It can be calculated by (13)

$$u_l = \frac{\rho_l^r}{wc_l + sc_l} \quad (13)$$

where u_l represent the utilization of link l , ρ_l^r is capacity utilized by working traffic and restored traffic.

Therefore, the novel performance index, namely Load Distribution Factor (LDF), is proposed here to evaluate the load distribution among all affected links that were used in restoration paths and can be calculated by the following equation.

$$LDF^s = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (u_l - \bar{u})^2}{|E|}}; u_l^s = 0 \quad (14)$$

Notation \bar{u} in (14) is arithmetic average utilization of network and can be computed as follow:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{l \in E} u_l}{|E|}; u_l^s = 0 \quad (15)$$

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The proposed model is evaluated by deploying in 11 nodes 23 bidirectional links network A [12] and 15 nodes, 28 bidirectional links network B [13] that more sparse than network A, depicted in Fig. 2 and 3, respectively. The spare capacity allocation of these networks is provided to achieve fully restoration in case of any single link failure. The demand patterns of all node pairs are uniformly distributed at a specific network throughput defined as the ratio between the network capacity utilized by the working path and the total working capacity in network [10]. The number of link failure scenario is $|E|$ and assuming that each single link failure is independent and identically distributed.

To investigate the performance of the proposed restoration scheme in terms of restoration ratio and Load Distribution Factor, the percentage of spare capacity and the network throughput are varied. For each single link failure case, the proposed restoration scheme in section 2 is compared against the restoration by using shortest paths and maximum flow (SP) [4], [8].

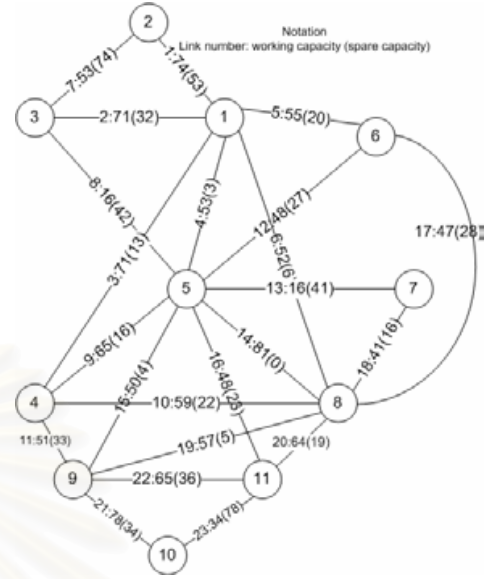


Fig. 2. Network A

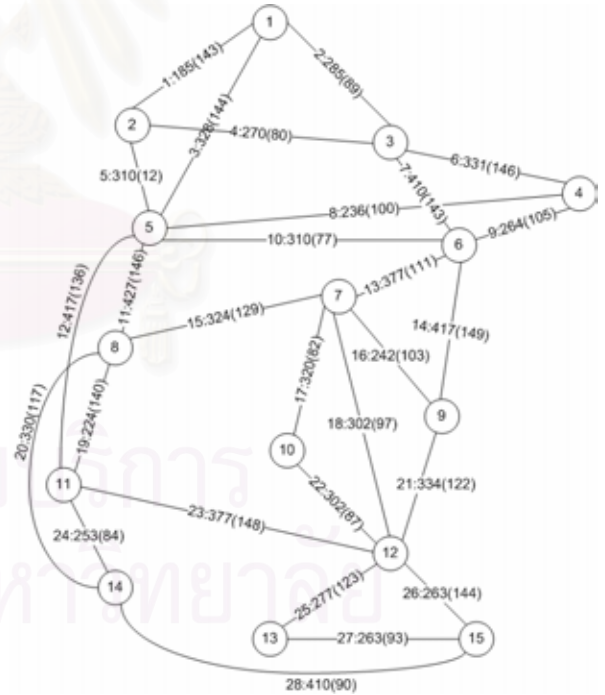


Fig. 3. Network B

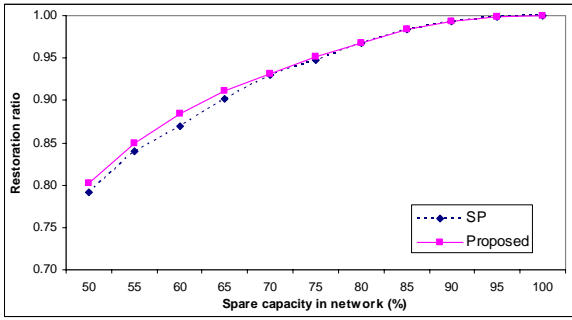


Fig. 4. Restoration ratio vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55, Network A

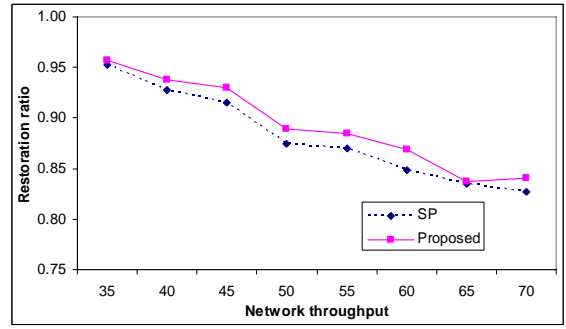


Fig. 8. Restoration ratio vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60%, Network A

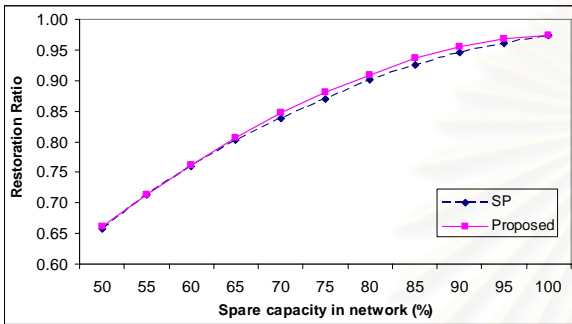


Fig. 5. Restoration ratio vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55, Network B

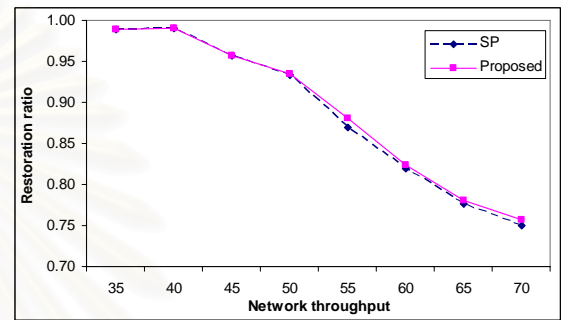


Fig. 9. Restoration ratio vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60%, Network B

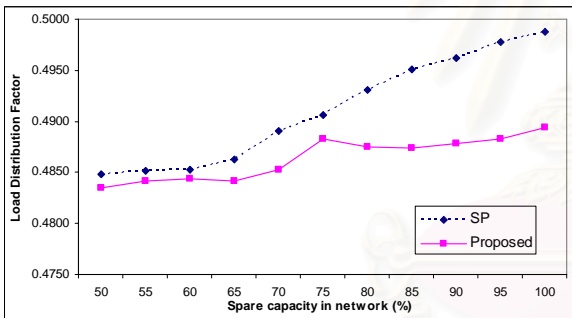


Fig. 6. Load Distribution Factor (LDF) vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55, Network A

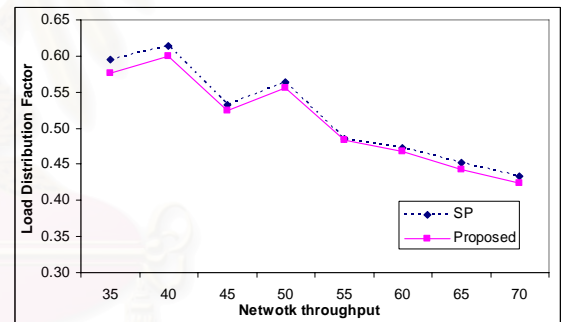


Fig. 10. Load Distribution Factor (LDF) vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60%, Network A

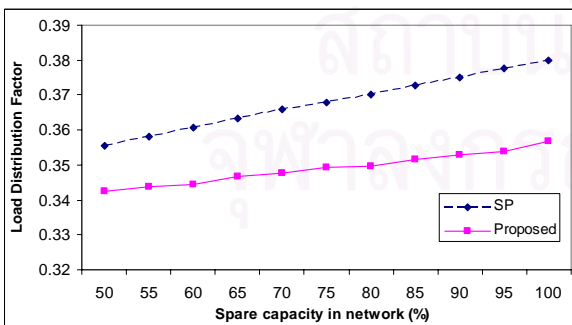


Fig. 7. Restoration ratio vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55, Network B

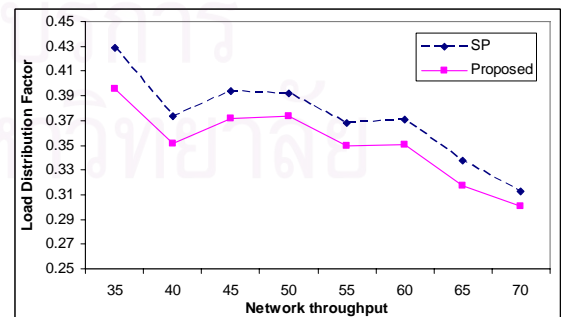


Fig. 11. Load Distribution Factor (LDF) vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60%, Network B

In first experiment, the spare capacities are varied (i.e. 50, 60, 95, 100 %) and network throughput as defined earlier is fixed at 0.55. According to the result shown in Fig. 4 and 5, these two figures give the same result, when the spare capacity is reduced, our scheme can guarantee the same or higher restoration ratio than SP because it can distribute the disrupted traffic to links that have lower utilization, instead of choosing shortest path and maximum flow of restoration paths as in SP scheme. However, in some cases, the proposed scheme achieves the same restoration ratio as SP because of insufficient spare capacity for restoration. Furthermore, the restoration ratio of network B is lower than network A since network A is denser than network B. The proposed scheme does not consider only pre-failure utilization of each link, but also consider the optimum disrupted traffic that should be assigned to restoration paths. The result shown in Fig. 6 and 7 clearly indicates that our scheme can greater balance the network load that have been affected from failure at all percentage of spare capacity.

Next, the test was run with various network throughputs (i.e. 0.30, 0.40, 0.65) and the spare capacity is fixed at 60 percent. In Fig. 8, at all network throughput values, the result shows that our scheme achieves the same or higher restoration ratio than SP due to reducing resource contention but the result in Fig. 9 show that our method can improve slightly restoration ratio because of the characteristic of network B that is quite sparse, so there is not enough path to acquire greater restoration ratio. However, the results of our proposed method can be improved on LDF value as the overall network load increases because of a reduced probability of finding a restoration route as a result of limited available spare capacity.

V. CONCLUSION

As mention above, the performance of network survivability can be evaluated in many ways such as the physical survivability for demand pair, the excess loss due to failure and Degree of disturbance, etc. In the aspect of load distribution in restoration scheme, using shortest paths to find maximum flow is not always the best solution for our network. In this paper, we presented the novel performance index to measure the load distribution after the disrupted traffic is restored and to decide whether the selected restoration scheme is appropriate for the network in consideration; therefore, the new restoration scheme is also proposed in order to find the optimum paths and reduce resource contention with consideration of link utilization and available spare capacity.

Experimental results show that our proposed index can represent the performance of restoration scheme appropriately. Furthermore, our scheme outperforms the shortest path not only in the aspect of load distribution in restoration scheme but also slightly enhances the restoration ratio. Therefore, well-designed restoration paths can improve

the survivability, although the demand is on rise or spare capacities are insufficient.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

REFERENCES

- [1] T1A1.2 Working Group on Network Survivability Performance. Technical report on Performance and Signal processing, Technical report, November 2000.
- [2] H. Lee, S.B. Kim and Y. Go, "Modeling and Algorithms for Physical Layer Network Survivability," *IEEE*, 1995, pp. 161-166
- [3] A.Z. Fahad, P.A. Jayasumana and A.H. Jahangir, "Network survivability performance evaluation with applications in WDM networks with wavelength conversion," *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN, Proceedings - 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, LCN 2004, 2004, pp. 344-351
- [4] C. Saivichit, "Network Reconfiguration Algorithm for Overcoming Faults arising in Networks," *Ph.D. thesis University of London*, May 2001
- [5] K. Gopalan, T. Chiueh and Y. J. Lin, "Load balancing Routing with Bandwidth-Delay Guarantees," *IEEE Communication Magazine*, June 2004, pp. 108-113
- [6] L.Ruan, H. Luo and C. Liu, "Dynamic Routing Algorithm with Load Balancing Heuristics for Restorable Connections in WDM Networks," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 22, no.9, November 2004.
- [7] A. Zolfaghari and F.J. Kaudel, "Framework for Network Survivability Performance," *IEEE Journal*, vol.12, pp. 46-51, Jan.1994.
- [8] C. Saivichit, J.A. Barria and L.F. Turner, "Topological Clusterisation for Fault Management in Large Telecommunication Networks," *IEEE*, 2003, pp. 1047-1051
- [9] D. Jungnickel, "Graphs, Networks and Algorithms (algorithms and Computation in Mathematics)," Springer, pp.171-186.
- [10] A. Giorgetti, L. Valcarengi and P. Casoldi, "Single-Layer Versus Multilayer Preplanned Lightpath Restoration," *IEEE Journal of lightwave technology*, vol 23., no. 10, October 2005.
- [11] Wayne D. Grover, "Mesh-Based Survivable Networks Option and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking," Prentice Hall PTR, 2003, pp. 188-202
- [12] M. Herzberg, S.J. Bye and A. Utano, "Hop-limit approach for spare-capacity assignment in survivable networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, no. 6, Dec, 1995, pp. 775-784
- [13] H. Sakauchi, Y. Nishimura and S. Hasegawa, "A Self-healing Network With an Economical Spare-channel Assignment," *IEEE GLOBECOM '90*, vol. 1, Dec 1990, pp. 438-443

Novel Performance Index based on Load Distribution Factor Restoration Scheme

Thirawat Krairiksh and Chaiyachet Saivichit
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand
Phone 0-2218-6907, Fax 0-2218-6912, E-mail Chaiyachet.S@Chula.ac.th

Abstract

In an event of failure, Network survivability performance could be demonstrated through restoration. Link restoration is the simplest restoration technique provided by determining paths around a failed link. We propose a novel performance index scheme for evaluating how well the restoration scheme can distribute the disrupted traffic among restoration paths. A modified restoration scheme is proposed in order to consider load distribution in path computation. Experimental results show that our proposed index can present a good representation of survivability value. By using our proposed restoration scheme, the network load is balanced, compared with shortest path scheme. The outcome of the restoration ratio are also improved equally well when traffic demands are increased or spare capacities is insufficient.

Keywords: Network Survivability, Restoration Paths, Load Distribution, Post-Failure Link Utilization.

1. Introduction

Traditionally, network designers aim at satisfying some specified performance objectives under normal condition rather than issue of network survivability. Performance under failure can be unpredictable with these design methods. With an increase of traffic demand, specifications of survivability performance are desirable. By considering survivability performance objectives, it will ensure that, under given failure scenarios, network performance will not degrade below predetermined levels.

There are many ways to quantify network survivability such as the physical survivability for demand pair [1] which is the ratio of the survived capacity to the working capacity for the demand pair. This model concentrates on mathematical and computational methods to evaluate and improve the survivability and spare capacity allocation. In [2], an analytical technique is proposed to evaluate the Excess Loss due to failure of the network assuming link i has failed, (ELF(i)), which is defined as fraction of traffic on the link that is not restored after failure. From [3], failures normally affect the performance of other components around the failed vicinity. Then, the novel quantification method, namely Degree of Disturbance (DoD), was proposed to model the effect of various failure scenarios. This takes into account the effect of failure in nodes and links on the affected demand.

The key idea of the proposed model is to consider load distribution in path computation, i.e. lighter-loaded links are preferred over heavier-loaded links when routing the restoration paths. The benefits of considering load

distribution in path computation can be seen from [4]. In this paper we firstly propose a novel performance index, Load Distribution Factor (LDF), to show how the restoration scheme can distribute the disrupted traffic among restoration paths, in case of single link failure. Therefore, the link restoration scheme is proposed to improve the survivability of network with consideration of link utilization and available spare capacity.

The rest of this paper is organized as follows. In section 2, we describe the analysis of survivability and link restoration scheme. We provide the proposed definition in Section 3. The simulation result and performance comparison between our proposed algorithm and other algorithm are presented in Section 4. Finally, we conclude this paper in section 5.

2. Background

2.1 Analysis of survivability

The survivability of network is defined as the ability of network to anticipate, prevent, protect and survive through various degrees of failures. A good network must be designed to provide some resource redundancy. The appropriate spare capacity must be justified to cope with the predetermined sets of failure scenarios. Once a failure occurs, network must be able to respond with a plausible action which minimizes several undesirable effects. The two basic approaches [5] for the survivability analysis and the development of performance measures are shown as follow:

Given occurrence of failure (GOF): the first approach is defined by assuming that given failure(s) have occurred. Either probabilistic weighting of various states of networks or deterministic analysis may be used.

Random occurrence of failure (ROF): The second uses probability of network failures and, possibly, rates of repair and/or restoration to calculate various probabilistic measures of network availability or unservability.

2.2 Link restoration

Generally, full services that are robust to failure are extremely desirable. Hence, in the event of failure, the way to improve network survivability is by restoration. The interrupted traffic must be rerouted via restoration paths. The existing restoration techniques can be classified as path restoration and link restoration. Path restoration restores the end-to-end channel whereas link restoration restores all affected traffic carried by a failed link facility, as shown in Figure 1. Compared with link restoration, path restoration needs less network resource but computationally hard and complex. Link restoration is

very efficient, fast and scalable. For these reasons, link restoration is selected instead of path restoration.

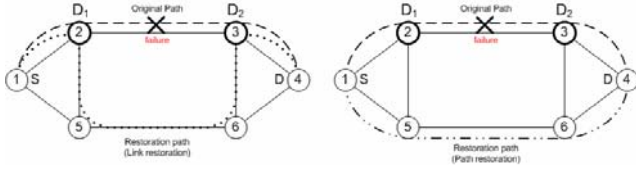


Figure 1. Link restoration vs. Path restoration

The link restoration scheme with topological cluterisation was proposed in [3], [6]. It uses shortest paths and maximum flow algorithm to find reconfigured subnetworks. Each subnetwork represented a set of network resources that is sufficient for the restoration of any failed link for each failure scenario. The algorithm obtains the set of nodes and links which is the minimum amount of resources required for the desired restoration level.

3. Proposed model

3.1 Network model

Given the failure of link l^* , the network model and the parameters utilized by the proposed model are presented.

$G(V, E)$ is the graph modeling the physical network with a set of $|V|$ nodes and $|E|$ links;

$P_h^{l^*}$ is the set of all possible paths with h hop limit between the connected nodes of failed link l^* ;

$R^{l^*} = \{r_1, \dots, r_k\}$ is the set of k restoration paths due to failure of link l^* ;

$L_{r,i}^{l^*} = \{l_1, \dots, l_n\}$ is the set of link in restoration path r_i ;

wc_l is the working capacity of link l ;

sc_l is the spare capacity of link l ;

$w_{r,i}^{l^*}$ is the weight of path r_i ;

Ω^{l^*} is the disrupted traffic of link l^* ;

$\Omega_{r,i}^{l^*}$ is the disrupted traffic that should be assigned to restoration path r_i ;

$f_{r,i}^{l^*}$ is the maximum feasible flow of path r_i due to failure of link l^* ;

3.2 Proposed restoration scheme

The Load and Spare capacity Weighted Restoration scheme (LSWR), is proposed with the objective of balancing the network traffic load and minimizing the error between the fraction of disrupted traffic assigned to each restoration path and the path selection probabilities that are computed to minimize resource contention. The proposed algorithm can be classified in two phases.

A. Preplanned phase

A1. All possible paths with h hop limit, $P_h^{l^*}$, between the connected nodes of link l^* will be preplanned.

A2. The Busy factor of each path p , $B_p^{l^*}$, are computed as follows:

$$B_p^{l^*} = \max_{\forall l \in p} \left(\frac{\rho_l}{wc_l + sc_l} \right) \quad (1)$$

where ρ_l is capacity utilized by working traffic.

Then, sort the restoration path into the value of Busy factor in increasing order (i.e. minimum to maximum).

A3. Find the maximum feasible flow ($f_p^{l^*}$) of each ordered paths above by using MKM Algorithm [6], [7] and record the orders path that $f_p^{l^*} > 0$ as restoration paths set (R^{l^*}), then, the maximum feasible flow can be calculated as follows:

$$F_R^{l^*} = \sum_{i=1}^k f_{r,i}^{l^*} \quad (2)$$

B. Restoration phase

B1. The weights for each path $r_i \in R^{l^*}$ are assigned as follows:

$$w_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*} \quad (3)$$

B2. The probability of choosing path r_i to carry the restored traffic is then computed using the following formula (4):

$$\Pr_{r,i}^{l^*} = \frac{w_{r,i}^{l^*}}{\sum_{i=1}^k w_{r,i}^{l^*}} \quad (4)$$

B3. The square Euclidean distance is introduced here to minimize the error between the fraction of disrupted traffic assigned to each restoration path and the path selection probabilities. It can be calculated by a well known equation (5).

$$D^{l^*} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{l^*}}{\Omega^{l^*}} - \Pr_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (5)$$

In case of $(F_R^{l^*} > \Omega^{l^*})$, the disrupted traffic that

is assigned to each restoration path can be computed as follows:

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{l^*} = \Omega^{l^*} \quad (6)$$

$$\Omega_{r,i}^{l^*} \leq f_{r,i}^{l^*} \quad (7)$$

From (5), there are many possible assignments of the disrupted traffic to the k restoration paths. Therefore, we will be used the iterative computation [8], [9] to get the optimum traffic assignment. Assuming that a set of N

channels is disrupted by the failure of link l^* ($\Omega^{l^*} = N$) at a specific iteration n overall N iterations, one channel of disrupted traffic is assigned so that the distance D^{n,l^*} , computed after iteration, is minimal.

$$D^{n,l^*} = \min_{j \in \{1, \dots, k\}} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Omega_{r,i}^{n-1,l^*} + \delta_j}{n} - \text{Pr}_{r,i}^{l^*} \right)^2 \quad (8)$$

where δ_j is a binary variable that is equal to 1 if and 0 otherwise, and Ω_i^{n-1,l^*} is the number of disrupted traffic assigned to subset i until iteration $n-1$. So, the constraint in (6), (7) becomes

$$\sum_{i=1}^k \Omega_{r,i}^{n,l^*} = n \quad (9)$$

$$\Omega_{r,i}^{N,l^*} \leq f_{r,i}^{l^*} \quad (10)$$

for each iteration n and specific link l^* failure

3.3 Novel performance index

In this paper, link utilization is defined as a ratio of the traffic carried by the link after the disrupted traffic is restored to the link capacity. It can be calculated by (11)

$$u_l = \frac{\rho_l^r}{wc_l + sc_l} \quad (11)$$

where u_l represent the utilization of link l , ρ_l^r is capacity utilized by working traffic and restored traffic.

So, the novel performance index, Load Distribution Factor (LDF), is proposed here to evaluate the load balancing among all affected links that were used in restoration paths and can be calculated by the following equation.

$$LDF^{l^*} = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (u_l - \bar{u})^2}{|E|}} \quad (12)$$

Notation \bar{u} in (9) is arithmetic average utilization of network and can be computed as follow:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{l \in E} u_l}{|E|} \quad (13)$$

4. Experimental results

The proposed model are evaluated in 11 nodes 23 bidirectional links LATA network, depicted in figure 2. The spare capacity allocation of this network is optimum in order to achieve fully restoration in case of any single link failure and the demand patterns of all node pairs are uniformly distributed at a specific network throughput defined as the ratio between the network capacity utilized by the working path and the total working capacity in network [9]. The number of link failure scenario is $|E|$ and

assuming that each single link failure is independent and identically distributed.

To investigate the performance of the proposed restoration scheme in terms of restoration ratio and Load Distribution Factor, the percentage of spare capacity and the network throughput are varied. For each single link failure case, the proposed restoration scheme in section 2 is compared against the restoration by using shortest paths and maximum flow (SP) [3].

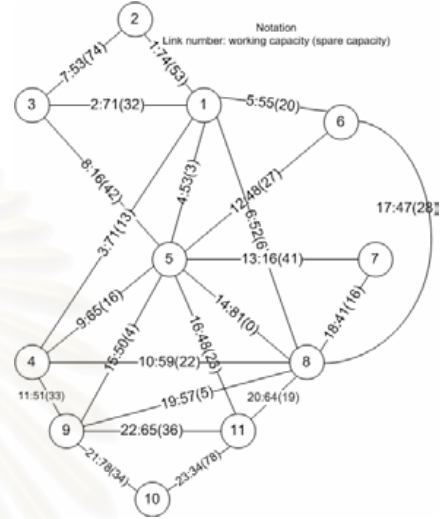


Figure 2. LATA network

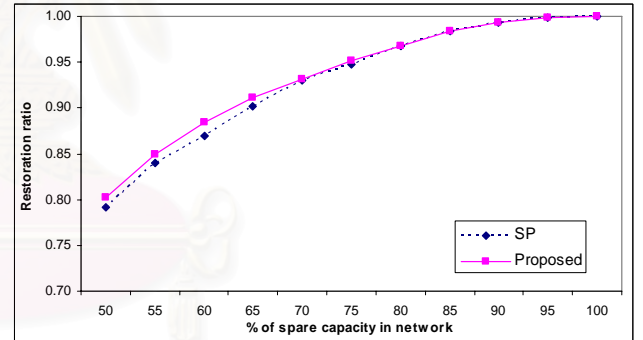


Figure 3. Restoration ratio vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55

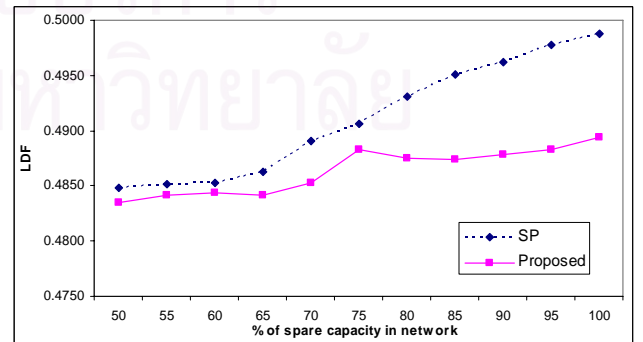


Figure 4. LDF vs. Spare capacity in network for network throughput = 0.55

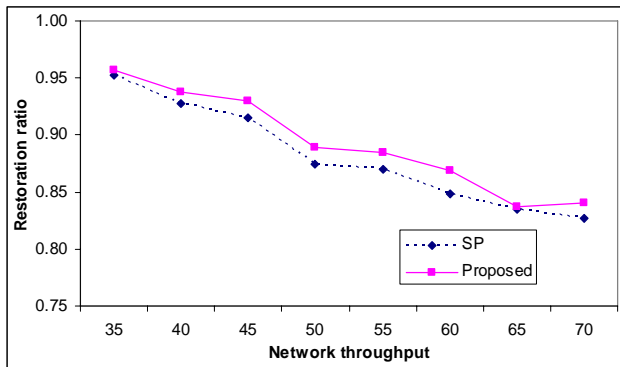


Figure 5. Restoration ratio vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60 %

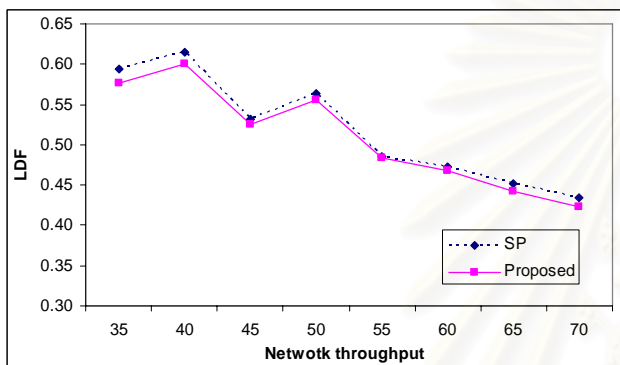


Figure 6. LDF vs. Network throughput by reducing spare capacity to 60 %

In first experiment, the spare capacities are varied (i.e. 50, 60, 95, 100 %) and network throughput as defined earlier is fixed at 0.55. According to the result shown in figure 3, when the spare capacity is reduced, our scheme achieves higher restoration ratio than SP because it can distribute the disrupted traffic to links that have lower utilization, instead of choosing shortest path and maximum flow of restoration paths as in SP scheme. The result shown in figure 4 clearly indicates that our scheme can greater balance the network load at all percentage of spare capacity.

Next, the test was run with various network throughputs (i.e. 0.30, 0.40, 0.65) and the spare capacity is fixed at 60 percent. In figure 5, at all network throughput values, the result shows that our scheme achieves higher restoration ratio than SP due to reducing resource contention. However, the results of our proposed method can be improved slightly on LDF value as the overall network load increases due to a reduced probability of finding a restoration route as a result of limited available spare capacity.

5. Conclusion

As mention above, there are many ways to quantify network survivability such as the physical survivability for demand pair, the excess loss due to failure and Degree of disturbance, etc. In the aspect of load distribution in restoration scheme, using shortest paths to find maximum flow is not always necessary best for our

network. In this paper, we presented the novel performance index to measure the load distribution after the disrupted traffic is restored and the new restoration scheme is also proposed in order to find the optimum paths and reduce resource contention with consideration of link utilization and available spare capacity.

In our experiment, the results show that our proposed index can represent the performance of restoration scheme appropriately. Furthermore, our scheme outperforms the shortest path not only in the aspect of load distribution in restoration scheme but also enhances the restoration ratio. Therefore, well-designed restoration paths can improve the survivability, although the demand is on rise or spare capacities are insufficient.

6. Acknowledgment

This work was supported in part by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

References

- [1] H. Lee, S.B. Kim and Y. Go, "Modeling and Algorithms for Physical Layer Network Survivability," *IEEE*, 1995, pp. 161-166
- [2] A.Z. Fahad, P.A. Jayasumana and A.H. Jahangir, "Network survivability performance evaluation with applications in WDM networks with wavelength conversion," *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN, Proceedings - 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004*, 2004, pp. 344-351
- [3] C. Saivichit, "Network Reconfiguration Algorithm for Overcoming Faults arising in Networks," *Ph.D. thesis University of London*, May 2001.
- [4] L.Ruan, H. Luo and C. Liu, "Dynamic Routing Algorithm with Load Balancing Heuristics for Restorable Connections in WDM Networks," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 22, no.9, November 2004.
- [5] A. Zolfaghari and F.J. Kaudel, "Framework for Network Survivability Performance," *IEEE Journal*, vol.12, pp. 46-51, Jan.1994.
- [6] C. Saivichit, J.A. Barria and L.F. Turner, "Topological Clusterisation for Fault Management in Large Telecommunication Networks," *IEEE*, 2003, pp. 1047-1051
- [7] M. Herzberg, S.J. Bye and A. Utano, "Hop-limit approach for spare-capacity assignment in survivable networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, no. 6, Dec, 1995, pp. 775-784
- [8] A. Fumagalli and L. Valcarenghi, "The Preplanned Weighted Restoration Scheme," *Optical Networking Advanced Research (OPNEAR)*, The University of Texas at Dallas, USA.
- [9] A. Giorgetti, L. Valcarenghi and P. Casoldi, "Single-Layer Versus Multilayer Preplanned Lightpath Restoration," *IEEE Journal of lightwave technology*, vol 23., no. 10, October 2005.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระวัฒน์ ไกรฤกษ์ เกิดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดอุบลราชธานี เข้ารับการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และได้สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย