

การวางความจุสำรองสำหรับการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อเชิงตรรกะภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเสียหาย
ของช่วงการเชื่อมต่อทางกายภาพ



นางสาวชัญญา เต็มแสงสิริศักดิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN: 974-17-3752-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPARE CAPACITY PLACEMENT FOR LOGICAL SPAN RESTORATION
UNDER PHYSICAL SPAN FAILURE ENVIRONMENT

Miss Kwanta Termsaengsirisak

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

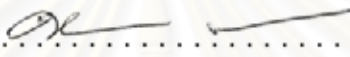
Faculty of Engineering

Academic Year 2005

ISBN: 974-17-3752-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การ วาง ความ จู สำรอง สำหรับ การ บูรณะ ช่วง การ เชื่อมต่อ เอง ตรรกะ ภายใต
สภาพแวดล้อมที่มีความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อทางกายภาพ
โดย นางสาววัลญดา เต็มแสงสิริศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

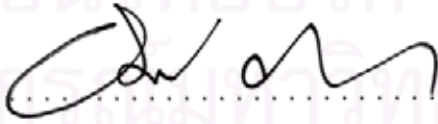

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญากร วุฒิสิทิกุลกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนิต ธีศวกุล)

ขวัญตา เต็มแสงสิริศักดิ์ : การวางความจุสำรองสำหรับการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อเชิงตรรกะภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อทางกายภาพ (SPARE CAPACITY PLACEMENT FOR LOGICAL SPAN RESTORATION UNDER PHYSICAL SPAN FAILURE ENVIRONMENT) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, 64 หน้า. ISBN: 974-17-3752-1.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีออกแบบการวางความจุให้กับโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายมีความจุใช้งานเพียงพอในการรองรับความต้องการส่งทราฟฟิกในสภาวะปกติ และมีความจุสำรองสำหรับการสร้างเส้นทางบูรณะเพื่อรองรับทราฟฟิกในสภาวะเกิดความเสียหาย สำหรับโครงข่ายที่ใช้วิธีการบูรณะความเสียหายแบบช่วงการเชื่อมต่อเมื่อพิจารณากรณีความเสียหายในระดับโครงสร้างทางกายภาพของโครงข่าย การออกแบบการวางความจุที่นำเสนอ นั้นคำนึงถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายในแง่ของค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย และพิจารณาถึงการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายของการวางความจุและค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย

ในการวิเคราะห์ปัญหานั้นเริ่มจากการสร้างสมการคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายแบบช่วงการเชื่อมต่อ เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าเหมาะที่สุด โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์คือค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เกิดจากการวางความจุมีค่าต่ำที่สุด และมีข้อกำหนดว่าค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายต้องมีค่าไม่ต่ำไปกว่าค่าที่ยอมรับได้ ส่วนการแก้ปัญหาของแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้น ได้นำเสนอวิธีการฮิวริสติกที่ใช้หลักการค้นหาแบบตาบอดเพื่อป้องกันไม่ให้ผลเฉลยที่ได้เป็นค่าเหมาะที่สุดเฉพาะที่ หลักการค้นหาอาศัยเทคนิคการวนซ้ำเพื่อหาผลเฉลย โดยในแต่ละรอบของการวนซ้ำนั้นต้องผ่านขั้นตอนการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานของคู่โหนด เพื่อเพิ่มค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งผลเฉลยที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของการชดเชยข้อดีข้อเสียของค่าใช้จ่ายในการวางความจุและค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายเป็นแบบไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ วิธีการวางความจุที่นำเสนอ นั้นให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าวิธีที่กำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ขวัญตา เต็มแสงสิริศักดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PM PM

ปีการศึกษา 2548

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

457 02323 21 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SPAN RESTORATION/ RESTORABILITY/ NETWORK AVAILABILITY/ TABU SEARCH.

KWANTA TERMSAENGSIRISAK : SPARE CAPACITY PLACEMENT FOR LOGICAL SPAN RESTORATION UNDER PHYSICAL SPAN FAILURE ENVIRONMENT. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYACHET SAIVICHIT, Ph.D., 64 pp. ISBN: 974-17-3752-1.

In this thesis, capacity placement algorithm has been proposed in order to provide network having enough working capacity to support traffic demand in normal situation and spare capacity to construct restoration path for effected traffic in failure situation. This algorithm is used for span-restorable network when physical conduit failure is considered. Network availability used as performance index has been taken into account in the design. The aim is to study trade-off between capacity cost and network availability.

In problem analysis, mathematical representation was formulated in order to approximate availability of a span-restorable network and was used in mathematical model which has been presented to find the optimum solution. The objective function of the model is to minimize total capacity cost while the constraint guarantees that network availability will not be greater than the acceptable value. To solve this problem, heuristic algorithm based on Tabu search is adapted to prevent the local optimum. Among the search procedure, iterative technique plays an important role. Working Path Adjustment Algorithm (WPAA) is applied during each iteration to improve spare capacity utilization. The main finding is that the correlation between capacity cost and network availability has a non-linear pattern. Futhermore, the proposed algorithm results in lower total cost than the conventional design which assigns working path as the shortest path.

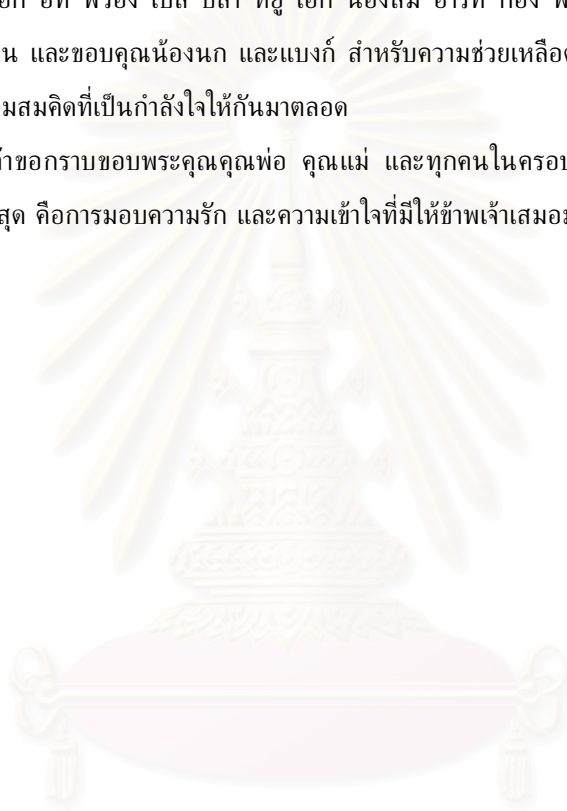
Department Electrical Engineering
Field of study Electrical Engineering
Academic year 2005

Student's signature . Kwanta Termsaengsirisak
Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา และผศ.ดร.เชาว์นิติศ อัสวกุล ซึ่งได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้กำลังใจ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอขอบคุณอาจารย์ภัทรชาติสำหรับคำแนะนำดีๆ รวมทั้งเพื่อน ๆ กลุ่มสัมมนาเน็ตเวิร์กทุกคน ไม่ว่าจะเป็นก้อย โบ นื่องโอ แอ็ด นื่องเต๊ะ ชาย มิงค์ โอ๊ก ฮัท พี่ว่อง เปิ้ล ปลา หยุ เอก นื่องส้ม อาร์ท ก้อง พี มิกซ์ นื่องกัส ที่ทำให้การทำวิจัยเป็นไปอย่างสนุกสนาน และขอบคุณน้องนก และแบงก์ สำหรับความช่วยเหลือด้านโปรแกรม ขอคุณหมวย และขอขอบคุณเพื่อนๆกลุ่มสมคิดที่เป็นกำลังใจให้กันมาตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการศึกษา และที่สำคัญที่สุด คือการมอบความรัก และความเข้าใจที่มีให้ข้าพเจ้าเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.3.3	การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อ ใดๆเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ (DFMC)	18
2.4.3.4	การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อ ใดๆเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะมากที่สุด (DFMR)	19
2.4.3.5	การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อ ที่มีความเสี่ยงร่วมกันเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ (SLRG-SCA)	20
2.4.4	วิธีการวางความจุที่นำเสนอ	21
3	การจำลองและแก้ไขปัญหาการวางความจุที่นำเสนอ	22
3.1	ค่าสภาพพร้อมใช้งานสำหรับโครงข่ายที่พิจารณาความเสียหายแบบ SRLG	22
3.2	การจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี SRLG-JCA-DCA	23
3.2.1	แนวทางการแก้ปัญหาของวิธี SRLG-JCA-DCA	26
3.2.2	ผลกระทบของการจัดสรรเส้นทางใช้งานต่อการวางความจุสำรอง	26
3.2.3	ขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน	31
3.3	ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกในการแก้ไขปัญหาการวางความจุวิธี SRLG-JCA-DCA	38
3.3.1	หลักการค้นหาแบบตามู	38
3.3.2	หลักการค้นหาแบบตามูสำหรับการออกแบบความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA	40
4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์	44
4.1	การ ชดเชย ข้อดี ข้อเสีย ระหว่าง ค่าใช้จ่าย ใน การ วาง ความ จุ และ ค่า สภาพ ไม่ พร้อม ใช้งาน ของ โครงข่าย	44
4.2	ผลจากการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน	52
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1	บทสรุป	54
5.2	ข้อเสนอแนะ	55
	รายการอ้างอิง	56
	บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์	59
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	64

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ค่าใช้จ่ยในการวางควมจของวิธี SCA เปรียบเทียบกับ JCA	29
ตารางที่ 3.2	ค่า $K_{i,e}$ ของการออกแบบควมจสำรองด้วยวิธี SCA	29



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่ 2.1	ประเภทของวิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อรองรับความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ	8
รูปที่ 2.2	การป้องกันและการบรรเทาความเสียหายในระดับช่วงการเชื่อมต่อเทียบกับระดับเส้นทาง	8
รูปที่ 2.3	เวลาในหนึ่งรอบความเสียหายของระบบที่มีการซ่อมแซมความเสียหาย	13
รูปที่ 2.4	ปัญหาการออกแบบการวางความจุ	16
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงการทำงานของวิธี SRLG-JCA-DCA	27
รูปที่ 3.2	โครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง	27
รูปที่ 3.3	การวางความจุที่ได้จากวิธี SCA เปรียบเทียบกับวิธี JCA	28
รูปที่ 3.4	ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อของวิธี SCA เปรียบเทียบกับวิธี JCA	29
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน WPAA	32
รูปที่ 3.6	การแก้ไขปัญหการวางความจุวิธี SRLG-JCA-DCA โดยใช้การค้นหาแบบตามู	41
รูปที่ 4.1	ค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA	45
รูปที่ 4.2	ค่าใช้จ่ายในการวางความจุใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA	45
รูปที่ 4.3	ค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA	45
รูปที่ 4.4	ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อโดยเฉลี่ยของวิธี WP:SP เปรียบเทียบกับวิธี WP:JCA	47
รูปที่ 4.5	จำนวนเส้นทางที่มีคาสภาพไม่พร้อมใช้งานเกินค่าที่กำหนดก่อนจะมีการวางความจุสำรอง จาก การวางเส้นทางใช้งานด้วยวิธี WP:SP เปรียบเทียบกับวิธี WP:JCA	47
รูปที่ 4.6	ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุโดยรวมในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามูเท่ากับ 3	48
รูปที่ 4.7	ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามูเท่ากับ 3	49
รูปที่ 4.8	ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามูเท่ากับ 3	49
รูปที่ 4.9	คาสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามูเท่ากับ 3	49

รูปที่ 4.10 ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อโดยเฉลี่ยในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3 50

รูปที่ 4.11 ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-SCA เปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA 51

รูปที่ 4.12 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุโดยรวมของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน . . 52

รูปที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน . . 53

รูปที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน . . 53



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง ส่งผลให้การพัฒนาศักยภาพของโครงข่ายสื่อสารเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางและวิธีการพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่มากขึ้นในปัจจุบัน และความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงข่ายสื่อสารมีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ การออกแบบโครงข่ายให้สามารถรองรับกับปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอเป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบโครงข่าย แต่สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ผู้ออกแบบโครงข่ายจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วย คือความน่าเชื่อถือได้ของโครงข่ายสื่อสาร เพราะผู้ใช้บริการต้องการความต่อเนื่องของการติดต่อสื่อสารข้อมูล ถึงแม้ในกรณีที่อุปกรณ์ของโครงข่ายเกิดความเสียหายหรือชำรุดขึ้น ก็ยังสามารถใช้บริการต่อไปได้โดยที่คุณภาพการบริการไม่ได้ลดลง ความสามารถในการให้บริการได้ของโครงข่ายหลังจากเกิดความเสียหายนี้เรียกว่า ความอยู่รอดได้ของโครงข่าย (network survivability) [1]

ในโครงข่ายความเร็วสูง (high speed network) เมื่อมีอุปกรณ์ของโครงข่ายได้รับความเสียหาย จะส่งผลกระทบต่อปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ดีต้องทำให้โครงข่ายมีความทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น (fault-tolerant network) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายใยแก้วนำแสงถูกตัดขาดซึ่งเป็นความเสียหายที่พบบ่อยที่สุด [1] ทั้งจากการขุดเจาะถนนและจากภัยธรรมชาติ ซึ่งบริหารจัดการกับความเสียหายนั้นสามารถทำได้โดยการสร้างเส้นทางบูรณะ (restoration path) สำหรับทราฟฟิกที่เส้นทางใช้งาน (working path) ถูกผลกระทบจากความเสียหายของสายใยแก้วนำแสง โดยให้ทราฟฟิกเหล่านี้ไปใช้ความจุสำรองที่วางอยู่ในข่ายเชื่อมโยงอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับความเสียหายจำเป็นต้องพิจารณาถึงกระบวนการสร้างเส้นทางบูรณะ (restoration process) ที่มีประสิทธิภาพ ควบคู่ไปกับการวางความจุสำรอง (spare capacity placement) ที่เหมาะสม เพราะถึงแม้โครงข่ายจะมีกระบวนการสร้างเส้นทางบูรณะที่ดี แต่ถ้าหากความจุสำรองถูกจัดวางอย่างไม่เหมาะสม โครงข่ายก็ไม่สามารถรองรับทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบได้ทั้งหมด

งานวิจัยในอดีตนั้นมีทั้งส่วนของการออกแบบกระบวนการสร้างเส้นทางบูรณะที่มีประสิทธิภาพ [2]-[8] และการออกแบบการวางความจุเพื่อรองรับความเสียหาย [8]-[27] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นถึงปัญหาในส่วนของการออกแบบการวางความจุ เพื่อให้โครงข่ายสามารถสร้างเส้นทางบูรณะรอบช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายได้

แนวทางการออกแบบการวางความจุสำหรับโครงข่ายเพื่อรองรับความเสียหายนั้น สามารถแบ่งได้เป็น

1. การออกแบบเฉพาะ การวางความจุสำรองเพื่อสร้างเส้นทางบูรณะกรณีเกิดความเสียหาย โดยกำหนดให้เส้นทางใช้งานในสภาวะปกติเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path)
2. การออกแบบการวางความจุใช้งาน (working capacity) เพื่อรองรับความต้องการใช้งานในสภาวะปกติควบคู่ไปกับการวางความจุสำรองเพื่อสร้างเส้นทางบูรณะในกรณีเกิดความเสียหาย

ซึ่งจากงานวิจัย [10]-[14] พบว่าการวางความจุใช้งานควบคู่ไปกับการวางความจุสำรองนั้น ถึงแม้ว่าเส้นทางใช้งานในสภาวะปกติจะไม่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ก็มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการวางความจุลดลง เนื่องจากความจุใช้งานสามารถกระจายไปทั่วโครงข่าย ดังนั้นทราบฟิสิกส์ที่ถูกผลกระทบเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงใดๆ จึงมีไม่มากเกินไป อีกทั้งยังได้ผลดีจากการใช้ความจุสำรองร่วมกันสำหรับรูปแบบความเสียหายที่ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันด้วยเหตุนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกพิจารณาวิธีการออกแบบทั้งการวางความจุใช้งานและความจุสำรองควบคู่กัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการวางความจุให้กับโครงข่ายนั้น จำเป็นต้องระบุจุดประสงค์และความต้องการของการออกแบบ เช่น มีเป้าหมายเพื่อรองรับความเสียหายในรูปแบบที่กำหนด โดยมีวัตถุประสงค์ให้เสียค่าใช้จ่ายในการวางความจุน้อยที่สุด งานวิจัย [7]-[14] พิจารณาถึงความเสียหายในรูปแบบที่มีช่วงการเชื่อมต่อเพียงหนึ่งช่วงเกิดความเสียหายเท่านั้น และมีข้อกำหนดว่าจะต้องวางความจุสำรองเพียงพอให้โครงข่ายมีความสามารถในการบูรณะ (restorability) ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือรองรับทราบฟิสิกส์ที่ถูกผลกระทบจากการที่มีหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายได้ทั้งหมด แต่นั่นไม่ได้หมายความว่าโครงข่ายจะมีค่าสภาพพร้อมใช้งาน (availability) ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วย เนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่ช่วงการเชื่อมต่อมากกว่าหนึ่งช่วงเกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน หรือมีช่วงการเชื่อมต่ออื่นเกิดความเสียหายในขณะที่ช่วงการเชื่อมต่อแรกที่เกิดความเสียหายยังซ่อมแซมไม่เสร็จ ส่งผลให้ความจุสำรองที่มีในโครงข่ายนั้นไม่เพียงพอ ดังนั้นในงานวิจัย [16], [17] จึงได้นำเสนอการวางความจุสำรองเพื่อรองรับทราบฟิสิกส์ทั้งหมดที่ถูกผลกระทบจากความเสียหายในกรณีที่ช่วงการเชื่อมต่อสองช่วงการเชื่อมต่อใดๆ ในโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน ส่วนงานวิจัย [18], [19] นำเสนอวิธีการวางความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายในกรณีที่ช่วงการเชื่อมต่อสองช่วงที่เชื่อมต่อกับโหนดเดียวกันเกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน โดยให้เหตุผลว่าสองช่วงการเชื่อมต่อที่เชื่อมต่อกับโหนดเดียวกันมีความเสี่ยงต่อความเสียหายร่วมกัน

เนื่องจาก การวาง ความจุสำรองเพื่อรองรับ รูปแบบ ความเสียหาย ที่มี มากกว่า หนึ่ง ช่วง การเชื่อมต่อ เกิด ความเสียหายพร้อมกันนั้นมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง [16], [17] ดังนั้นการออกแบบความจุสำรองเพื่อให้โครงข่ายมีความสามารถในการบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์นั้น ในทางปฏิบัติอาจจะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากกรณีที่สองข่ายเชื่อมโยงใดๆซึ่งมีโอกาสเกิดความเสียหายเป็นอิสระต่อกัน จะเกิดความเสียหายพร้อมกันนั้นมีความเป็นไปได้ต่ำ ดังนั้นในมุมมองกลับกัน การออกแบบการวางความจุสำรองจึงเป็นไปในลักษณะที่ว่า จะวางความจุสำรองอย่างไรให้โครงข่ายสามารถทำการบูรณะความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีงบประมาณจำกัด โดยสิ่งที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายนั้นคือ ค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย (network availability) โดยให้นิยามเป็นค่าความน่าจะเป็นที่โครงข่ายสามารถให้บริการได้ หรืออยู่ในสภาวะพร้อมให้บริการที่เวลาใดๆ [1] ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้

ชี้วัดความอยู่รอดของโครงข่าย ในการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับความเสียหายที่ดี ต้องพิจารณาให้โครงข่ายมีค่าสภาพพร้อมใช้งานมากที่สุด ในงานวิจัย [17], [20] เสนอวิธีการคำนวณหาค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหาย เมื่อมีสองข่ายเชื่อมโยงใดๆเกิดความเสียหายพร้อมกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสภาพพร้อมใช้งานโครงข่ายนั้น เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอัตราความเสียหาย ค่าเวลาที่โครงข่ายใช้ในการบูรณะความเสียหาย และความสามารถในการบูรณะความเสียหายของโครงข่าย

ในทางปฏิบัติของการเดินสายใยแก้วนำแสงนั้น ช่วงการเชื่อมต่อหลายๆช่วงจำเป็นต้องติดตั้งลงบนทางเดินสายเดียวกัน เนื่องจากการติดตั้งสายใยแก้วนำแสงในโครงข่ายมีค่าใช้จ่ายสูง และข้อจำกัดทางด้านภูมิศาสตร์ ดังนั้นรูปแบบความเสียหายที่ควรพิจารณานั้นควรเป็นรูปแบบที่สมเหตุสมผลในทางปฏิบัติ นั่นคือ รูปแบบความเสียหายของอุปกรณ์ที่เป็นทางเดินของสายใยแก้วนำแสง (cabling paths) ซึ่งเมื่อเกิดความเสียหายแล้วจะส่งผลให้ช่วงการเชื่อมต่อทั้งหมดที่อยู่ในทางเดินสายนั้นเสียหายพร้อมกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้พิจารณารูปแบบความเสียหายของอุปกรณ์ทางกายภาพที่เป็นทางเดินสาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะแก้ปัญหาสำหรับเหตุการณ์ดังกล่าว โดยการออกแบบการวางความจุใช้งานควบคู่กับความจุสำรองให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับความเสียหายตั้งแต่ระดับโครงสร้างทางกายภาพ (physical structure) ของโครงข่าย และมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในแง่ของสภาพพร้อมใช้งานโครงข่าย ซึ่งจะนำวิธีการของงานวิจัย [17], [20] มาเป็นต้นแบบในการคิดค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย

การแก้ไข้ปัญหา การวาง ความ จุ สำรอง นั้น โดยส่วนมาก เป็นการ จำลอง ปัญหา ทาง คณิตศาสตร์ แบบ เป็น กำหนดการเชิงเส้น (linear programming) [8]-[17] ซึ่งรับประกันว่าผลเฉลยที่ได้เป็นค่าเหมาะที่สุด (optimum) แต่มีข้อเสียคือ ความซับซ้อนในการหาผลเฉลยนั้นแปรตามขนาดของโครงข่าย ซึ่งต้องใช้เวลานานในการค้นหาผลเฉลย จึงได้มีงานวิจัย [15], [21], [22], [23], [24] ที่เสนอการค้นหาผลเฉลยด้วยขั้นตอนวิธีฮิวริสติก (heuristic algorithm) ซึ่งถึงแม้ผลเฉลยที่ได้เป็นเพียงการประมาณให้ใกล้เคียงกับค่าเหมาะที่สุด แต่ก็ช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาลงได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกเหล่านี้ไม่ได้คำนึงถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานในการออกแบบการวางความจุ อีกทั้งยังเป็นการออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง โดยกำหนดเส้นทางใช้งานไว้ล่วงหน้าให้เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด และจากที่ได้กล่าวข้างต้นว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คำนึงถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบด้วย และพิจารณาการออกแบบทั้งความจุใช้งานและความจุสำรองร่วมกัน ส่งผลให้แบบจำลองในการแก้ไข้ปัญหานั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) จึงได้เสนอขั้นตอนวิธีฮิวริสติก ที่อาศัยหลักการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu search) มาช่วยในการค้นหาผลเฉลย ซึ่งหลักการค้นหาแบบตาบู่ที่ใช้เทคนิคการทำซ้ำ (iterative technique) เพื่อปรับปรุงผลเฉลยให้ดีขึ้น โดยระหว่างกระบวนการค้นหาผลเฉลยนั้นจะเก็บข้อมูลบางอย่างไว้เพื่อมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป และแต่ละรอบการทำซ้ำนั้นสามารถยอมรับผลเฉลยที่แย่กว่าผลเฉลยปัจจุบันได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ผลเฉลยที่ได้ตกลงสู่ค่าเหมาะที่สุดเฉพาะที่ (local optimum) [25], [26] หลักการของตาบู่นี้ได้นำมาแก้ไข้ปัญหาในส่วนของ การปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานเพื่อให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายในการวางความจุเพื่อรองรับความเสียหายมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายแบบช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบการวางความจุ โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์คือทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เกิดจากการวางความจุมีค่าต่ำที่สุด และมีข้อกำหนดว่าค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายต้องมีค่าไม่ต่ำไปกว่าค่าที่ยอมรับได้ ในการแก้ปัญหานั้นใช้เทคนิคการวนซ้ำเพื่อหาผลเฉลยในแต่ละรอบของการวนซ้ำนั้น ใช้หลักการค้นหาแบบตาบู่ในการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานของคูโนด เพื่อลดภาระของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อร่วมกับการใช้โปรแกรม CPLEX เพื่อหาผลเฉลยของการวางความจุสำรองหลังจากที่กำหนดเส้นทางใช้งานและความจุใช้งานไว้แล้ว และนำผลเฉลยที่ได้จากการรัน CPLEX มาเปรียบเทียบกัน เพื่อเลือกผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบนั้น มาเป็นผลเฉลยตั้งต้นไปการทำซ้ำรอบถัดไป จนกว่าจะครบรอบการทำซ้ำที่กำหนด ซึ่งผลเฉลยที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ของวิธีที่เสนอนั้นให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการวางความจุต่ำกว่าวิธีที่กำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

เพื่อออกแบบวิธีการวางความจุที่เหมาะสมให้กับโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายสามารถทำการบูรณะทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหายทางกายภาพของอุปกรณ์ที่เป็นทางเดินของสายใยแก้วนำแสง เช่น ท่อร้อยสายใยแก้วนำแสง (conduit) หรือรางเดินสาย (cable tray) ซึ่งความเสียหายนี้ส่งผลให้ช่วงการเชื่อมต่อของสายใยแก้วนำแสงหลายช่วงเกิดความเสียหายพร้อมกัน โดยหลักการออกแบบนั้นพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นควบคู่กับค่าสภาพพร้อมใช้งานโครงข่าย เพื่อให้ความจุที่วางลงไปโครงข่ายนั้นถูกใช้งานอย่างคุ้มค่า

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการออกแบบการวางความจุในโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับความต้องการใช้งานในสภาวะปกติ และสามารถสร้างเส้นทางบูรณะสำหรับรองรับทราฟฟิกในสภาวะเกิดความเสียหาย ซึ่งใช้วิธีการบูรณะแบบช่วงการเชื่อมต่อ และพิจารณารูปแบบความเสียหายในระดับโครงสร้างทางกายภาพของโครงข่ายหรือลักษณะการติดตั้งช่วงการเชื่อมต่อ โดยมีข้อกำหนดว่าไม่มีเหตุการณ์ที่จะเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ที่เป็นทางเดินสายมากกว่าหนึ่งเส้นพร้อมกัน การออกแบบการวางความจุนั้นคำนึงถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายในแง่ของค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย เมื่อกำหนดให้โครงข่ายมีงบประมาณจำกัดในการวางความจุ และพิจารณาถึงการผลิตเขยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายและค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย

1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษา ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งความรู้และทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย

2. กำหนดรูปแบบของปัญหา และแบบจำลองที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา
3. เขียนโปรแกรมทดสอบวิธีที่ได้เสนอ
4. วิเคราะห์ และประเมินผลการทดสอบ
5. สรุป วิเคราะห์ และรวบรวมข้อมูลทั้งหมด พร้อมทั้งจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เนื่องจากงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ผู้ออกแบบโครงข่ายจำเป็นต้องสรรหาวิธีที่เหมาะสมในการวางความจุ เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับทราฟฟิกที่เส้นทางใช้งานขาดการเชื่อมต่อจากการเกิดความเสียหายซึ่งวิทยานิพนธ์นี้สังเกตเห็นถึงประโยชน์จากการออกแบบการวางความจุเพื่อรองรับความเสียหายจากโครงสร้างทางกายภาพของการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสง เพราะเป็นรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ประโยชน์ที่ได้รับจากการออกแบบโดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองควบคู่ไปกับค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายคือทำให้โครงข่ายสามารถใช้ทรัพยากรที่มีจำกัดได้อย่างเกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้บริการมากที่สุด ในแง่ของการรับประกันความน่าเชื่อถือของโครงข่าย

1.7 ประมวลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่ได้รับ

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย วิธีการสร้างเส้นทางบูรณะเพื่อรองรับความเสียหายในรูปแบบต่างๆ หลักการวัดค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบการวางความจุสำรองให้กับโครงข่าย และวิธีวางความจุสำรองต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการรองรับรูปแบบความเสียหาย โดยใช้แบบจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์

บทที่ 3 การจำลองและแก้ไขปัญหาการวางความจุที่นำเสนอ

กล่าวถึงวิธีการคำนวณ ค่าสภาพพร้อมใช้งาน ของโครงข่ายที่พิจารณา ความเสียหายในระดับชั้น กายภาพ วิธีการจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีการพิจารณาค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายร่วมกับค่าใช้จ่ายในการวางความจุ เสนอขั้นตอนวิธีในการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานที่ใช้ในระหว่างกระบวนการค้นหาผลเฉลย และขั้นตอนวิธีการหาผลเฉลยที่อาศัยหลักการค้นหาแบบตาบู่

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

กล่าวถึงผลที่ได้จากการวางความจุด้วยวิธีที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการวางความจุที่มีการกำหนดเส้นทางใช้งานไว้ล่วงหน้า โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัยฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง และแนวคิดในการแก้ไขปัญหา โดยส่วนต้นนั้นจะกล่าวถึงวิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อรองรับความเสียหายในรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงหลักการวัดค่าความอยู่รอดของโครงข่าย โดยพิจารณาจากค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบการวางความจุสำรองให้กับโครงข่าย และในส่วนหลังจะกล่าวถึงวิธีวางความจุสำรองต่างๆที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการรองรับรูปแบบความเสียหาย

2.1 คำจำกัดความ

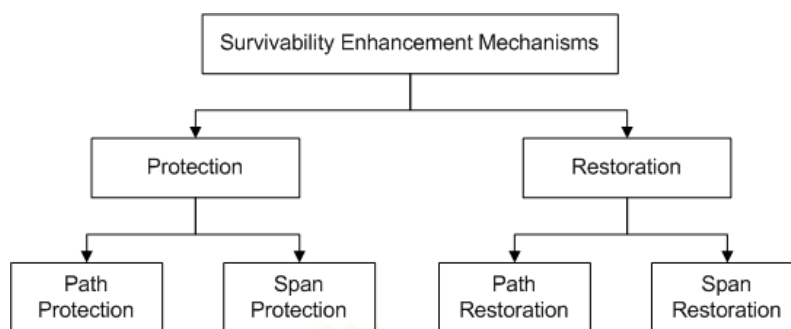
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ท่อร้อยสาย (conduit) เป็นอุปกรณ์ที่เป็นทางผ่านของสายเชื่อมโยง (link) ซึ่งการวางท่อร้อยสายในโครงข่ายนั้นขึ้นอยู่กับต้นทุนในการติดตั้ง และปัจจัยทางภูมิศาสตร์ ท่อร้อยสายนั้นจะถูกพิจารณาให้เป็นโครงสร้างของโครงข่ายในระดับชั้นกายภาพ (physical layer) ซึ่งเป็นระดับชั้นล่างสุด ส่วนสายเชื่อมโยง คือช่องทางการสื่อสารระหว่างโหนด และเรียกกลุ่มของสายเชื่อมโยงทั้งหมดที่เชื่อมต่อระหว่างโหนด (node pair) เดียวกันว่าช่วงการเชื่อมต่อ (span) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ช่วงการเชื่อมต่อแต่ละช่วงระหว่างโหนดใดๆ เป็นระดับชั้นตรรกะ (logical layer) ซึ่งเดินทางผ่านท่อร้อยสายหนึ่งท่อหรือมากกว่าก็ได้ และกำหนดให้เส้นทาง (path) คือเซตของสายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกันจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางของคู่โหนดสื่อสาร

2.2 วิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อเพิ่มความอยู่รอดของโครงข่าย

เมื่อมีสายเชื่อมโยงถูกตัดขาด ส่งผลให้บางเส้นทางใช้งานขาดการเชื่อมต่อ ทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจึงจำเป็นต้องหาเส้นทางใหม่ (reroute) เพื่อไปใช้เส้นทางสำรอง (backup path) วิธีการสร้างเส้นทางสำรองนั้นมีหลายวิธีสามารถแบ่งได้ตามเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งได้แก่

- เส้นทางสำรองและความจุสำรองถูกเตรียมไว้ล่วงหน้าก่อนเกิดความเสียหายหรือไม่
- เส้นทางสำรองนั้นถูกสร้างขึ้นที่จุดใดในโครงข่าย
- ความจุสำรองที่วางลงไปในโครงข่ายนั้นสามารถใช้ร่วมกันสำหรับแต่ละความเสียหายที่ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันหรือไม่

ในแผนภาพที่ 2.1 แสดงถึงความแตกต่างของวิธีการสร้างเส้นทางสำรอง แบ่งได้เป็น 2 แบบตามหลักของการเตรียมเส้นทางสำรอง คือ การป้องกันความเสียหาย (protection) และการบูรณะความเสียหาย (restoration) ในการป้องกันความเสียหายนั้น ทุกเส้นทางใช้งานจะมีการเตรียมเส้นทางสำรอง และจองความจุสำรองไว้ล่วงหน้าก่อนเกิด



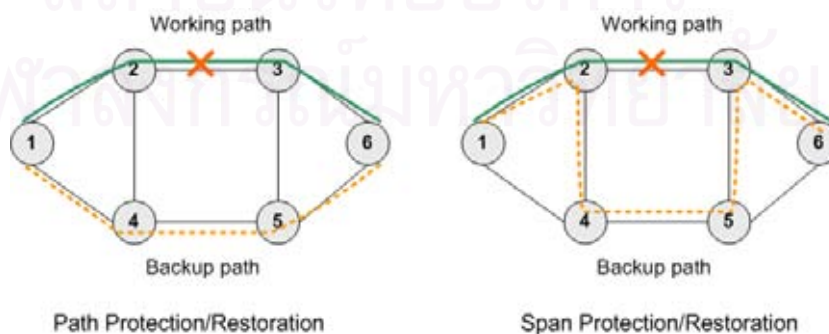
รูปที่ 2.1 ประเภทของวิธีการสร้างเส้นทางสำรองเพื่อรองรับความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ

ความเสียหายที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น เส้นทางสำรองที่เตรียมไว้จึงอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน (ready-to-use state) โดยไม่ต้องทำการเชื่อมต่อใหม่ และไม่ต้องส่งสัญญาณ (signaling) ระหว่างกัน เพื่อสร้างเส้นทางสำรอง [1] ส่วนวิธีการบูรณะความเสียหายนั้นจะไม่มีเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า ดังนั้นเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น โครงข่ายจะทำการหาเส้นทางสำรองที่ว่างอยู่ในขณะนั้นเพื่อเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ถูกกระทบ

นอกจากนี้ ทั้งการป้องกันและการบูรณะความเสียหายยังแบ่งออกได้อีกตามเกณฑ์ของตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อของทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย นั่นคือเส้นทางสำรองสามารถสร้างขึ้นได้ทั้งในระดับช่วงการเชื่อมต่อ (span protection, span restoration) และระดับเส้นทาง (path protection, path restoration) [1], [6]

การสร้างเส้นทางสำรองในระดับเส้นทางนั้น เส้นทางสำรองจะถูกสร้างขึ้นระหว่างคู่โหนดที่เป็นโหนดต้นทาง (source node) และโหนดปลายทาง (destination node) ของเส้นทางใช้งานที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย นั่นคือเป็นการสร้างเส้นทางสำรองในลักษณะปลายถึงปลาย (end-to-end) ส่วนการสร้างเส้นทางสำรองในระดับช่วงการเชื่อมต่อนั้น เส้นทางสำรองจะถูกสร้างขึ้นในบริเวณรอบๆช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหาย โหนดที่อยู่ติดกับช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายจะทำการจัดการเชื่อมต่อ (switch) ทราฟฟิกทั้งหมดไปยังเส้นทางสำรอง โดยไม่มีการส่งสัญญาณหรือข่าวสาร (message) ไปแจ้งให้กับโหนดต้นทางและโหนดปลายทางของเส้นทางใช้งานที่ถูกกระทบให้รับรู้ถึงความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในแต่ละวิธีการสร้างเส้นทางสำรองนั้นมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ซึ่งสามารถแจกแจงได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 การป้องกันและการบูรณะความเสียหายในระดับช่วงการเชื่อมต่อเทียบกับระดับเส้นทาง

- การป้องกันความเสียหายระดับเส้นทาง (Path protection)
ทุกเส้นทางใช้งานมีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ และแต่ละเส้นทางสำรองที่ถูกเตรียมไว้ต่างก็ได้มีการจองความจุสำรองไว้ และไม่สามารถถูกใช้ร่วมกันระหว่างเส้นทางสำรองหลายๆเส้นทาง การป้องกันความเสียหายวิธีนี้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการป้องกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1+1 protection) วิธีนี้มีข้อดีคือ เส้นทางสำรองสามารถใช้ได้ทันทีที่มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่มีข้อเสียคือ เปลืองความจุสำรองมาก [1]
- การบูรณะความเสียหายระดับเส้นทาง (path restoration)
เนื่องจากไม่มีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า การสร้างเส้นทางสำรองด้วยวิธีนี้ใช้เวลานาน จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม เพราะโอกาสที่จะเกิดการแย่งกันใช้ความจุสำรองของแต่ละคุโนดมีค่าสูง [13]
- การป้องกันความเสียหายระดับช่วงการเชื่อมต่อแบบจองความจุสำรอง (span protection)
วิธีนี้ต้องมีการเตรียมเส้นทางสำรองและจองความจุสำรองไว้สำหรับทุกช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการป้องกันความเสียหายระดับเส้นทางแล้ว วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานความจุสำรองต่ำกว่า เพราะขาดความยืดหยุ่นในการจัดหาเส้นทาง จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในแง่ของการใช้งานความจุสำรอง [12]
- การบูรณะความเสียหายระดับช่วงการเชื่อมต่อ (span restoration)
เนื่องจากไม่มีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า การสร้างเส้นทางสำรองนั้นทำเมื่อคุโนดที่อยู่ติดกับช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายสามารถตรวจจับ (detect) ความเสียหายได้ คุโนดดังกล่าวจะทำการกระจาย (flooding) ข้อมูลไปทั่วโครงข่ายเพื่อหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความจุสำรองที่ว่างอยู่ และทำการจองความจุสำรองเหล่านั้นเพื่อสร้างเส้นทางสำรอง หลังจากนั้นจึงทำการจัดการเชื่อมต่อทราฟฟิกทั้งหมดไปยังเส้นทางสำรองที่ถูกสร้างขึ้น การบูรณะความเสียหายระดับช่วงการเชื่อมต่อนี้ไม่มีการแย่งกันใช้ความจุสำรอง เพราะการหาเส้นทางสำรองถูกทำโดยคุโนดเพียงคู่เดียว [8]

หากแบ่งวิธีการสร้างเส้นทางสำรองตามเกณฑ์ของรูปแบบการใช้ความจุสำรอง ว่าความจุสำรองนั้นสามารถใช้ร่วมกันระหว่างรูปแบบความเสียหายหลายรูปแบบที่คาดว่าจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันหรือไม่ ดังนั้นสำหรับวิธีการสร้างเส้นทางสำรองบางวิธีที่ไม่ได้มีการจองความจุสำรองไว้ แต่ละรูปแบบความเสียหายสามารถใช้ความจุสำรองร่วมกันเพื่อเป็นการลดปริมาณความจุสำรองที่ต้องวางลงไปโครงข่ายได้ จึงเป็นการลดต้นทุน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการป้องกันความเสียหายนั้นไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการใช้ความจุสำรองร่วมกันได้

ถ้าเปรียบเทียบระหว่างวิธีการป้องกันความเสียหายและการบูรณะความเสียหายในแง่มุมอื่นนอกเหนือจากการใช้ความจุสำรอง จะเห็นได้ชัดว่าข้อดีของการป้องกันความเสียหาย คือ ช่วยลดความยุ่งยากของการสร้างเส้นทางสำรอง แต่ก็มีข้อเสียคือขาดความยืดหยุ่น (flexibility) สำหรับความเสียหายในบางกรณีที่ไม่ได้มีการคาดการณ์ไว้ [6], [13] เช่น เหตุการณ์ที่เส้นทางใช้งานและเส้นทางสำรองที่เตรียมไว้เกิดความเสียหายทั้งคู่ ในกรณีนี้โครงข่ายจะไม่สามารถดำเนินการหาเส้นทางสำหรับรองรับการเชื่อมต่อได้อีก นอกจากนี้วิธีการป้องกันความเสียหายยังไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่มีปริมาณทราฟฟิกเปลี่ยนแปลงบ่อยหรือเมื่อมีการปรับเปลี่ยนทอพอโลยี (topology) ของโครงข่าย [23] อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีการบูรณะความเสียหายก็มีข้อเสียเช่นกัน คือมีความยุ่งยากใน

กระบวนการสร้างเส้นทางสำรอง ดังนั้นอีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นการผสมผสานระหว่างทั้ง 2 วิธีเข้าด้วยกัน นั่นคือโครงข่ายมีการเตรียมเส้นทางสำรองก่อนเกิดความเสียหาย แต่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อเตรียมไว้ และไม่ได้จองความจุสำรองเอาไว้ ซึ่งเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น โครงข่ายจะเสียเวลาในการตรวจจับความเสียหาย ส่งข่าวสารเพื่อแจ้งความเสียหาย (failure notification) และทำการเชื่อมต่อไปยังความจุสำรองในเส้นทางสำรองที่เตรียมไว้แล้วเท่านั้น และวิธีนี้ยังได้ประโยชน์ในการใช้ความจุสำรองร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพเหมือนวิธีบูรณะความเสียหายด้วย [1] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกพิจารณาการสร้างเส้นทางสำรองด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งถึงแม้วิธีนี้จะมีส่วนที่แตกต่างจากวิธีการบูรณะความเสียหายโดยแท้ (pure restoration) แต่มีความใกล้เคียงกันในแง่ของการใช้ความจุสำรอง จึงขอเรียกว่าเป็นวิธีการบูรณะความเสียหายเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจคือการวางความจุสำรอง ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นวิธีการสร้างเส้นทางสำรองแบบการบูรณะความเสียหายโดยแท้ หรือการบูรณะความเสียหายแบบรู้เส้นทางสำรองล่วงหน้า ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้เป็นแบบที่มีการใช้ความจุสำรองร่วมกัน จึงต้องการวางความจุสำรองไม่ต่างกัน ทำให้การกำหนดรูปแบบของปัญหาการออกแบบการวางความจุสำรองนั้นเหมือนกัน นั่นคือ หากการสร้างเส้นทางสำรองในกระบวนการบูรณะความเสียหายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้งานความจุสำรองได้เต็มที่ ความจุสำรองที่ได้จากการออกแบบก็จะมีเพียงพอในการรองรับความเสียหายได้

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการบูรณะความเสียหายมีทั้งการบูรณะระดับเส้นทางและระดับช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งการบูรณะในระดับเส้นทางนั้นต้องการความจุสำรองในการรองรับความเสียหายน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการบูรณะจะยุ่งยากและมีการแย่งกันใช้ความจุสำรองของหลายๆจุด [2], [6], [23] ทำให้โครงข่ายจะต้องใช้เวลาในการบูรณะมาก และยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ (load) ต่ำกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการนำเสนอวิธีวางความจุสำรองสำหรับโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายในระดับช่วงการเชื่อมต่อเท่านั้น

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการวางความจุสำรอง

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความจุสำรองที่ต้องการเพื่อเพิ่มความมั่งคั่งให้กับโครงข่าย ได้แก่

- วิธีการที่โครงข่ายใช้ในการบูรณะความเสียหาย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวิธีการบูรณะความเสียหายที่ต่างกันต้องการความจุสำรองต่างกัน และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการบูรณะระดับช่วงการเชื่อมต่อ

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานที่ยอมรับได้

รูปแบบของการบริการแต่ละประเภทมีค่าสภาพพร้อมใช้งานที่ยอมรับได้ต่างกัน การบูรณะความเสียหายให้ครบ 100 เปอร์เซ็นต์นั้นไม่จำเป็นสำหรับทราฟฟิกบางประเภท แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะคำนึงถึงทราฟฟิกประเภทเดียวเท่านั้น

- ทอพอโลยีของโครงข่าย

ลักษณะการเชื่อมต่อ (connectivity) ของโครงข่ายมีผลต่อปริมาณความจุสำรองที่ต้องการ ใน [14] ศึกษา

ปริมาณความจุสำรองที่ต้องการสำหรับหลายๆโครงข่ายที่มีค่า connectivity ต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันแบบหนาแน่น (หรือโครงข่ายที่มีค่า connectivity สูง) ต้องการความจุสำรองน้อยกว่าโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันแบบเบาบาง (หรือโครงข่ายที่มีค่า connectivity ต่ำ)

- รูปแบบความเสียหายที่พิจารณา

ปริมาณความจุสำรองที่ต้องวางในโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายมีอัตราการบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์นั้นขึ้นอยู่กับว่าจะพิจารณาความเสียหายในรูปแบบใด เช่น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความจุสำรองที่ต้องการในการรองรับรูปแบบความเสียหายที่มีสองช่วงการเชื่อมต่อใดๆเกิดความเสียหายพร้อมกัน กับรูปแบบที่มีเพียงแค่ช่วงการเชื่อมต่อเดียวเกิดความเสียหาย ผลปรากฏว่าโครงข่ายที่ออกแบบเพื่อรองรับทุกกรณีในช่วงการเชื่อมต่อสองช่วงใดๆเกิดความเสียหายพร้อมกันนั้นต้องการปริมาณความจุสำรองมากกว่ากรณีที่พิจารณาเพียงแค่ช่วงการเชื่อมต่อเดียวเกิดความเสียหายถึง 3 เท่า [17]

- วิธีการเลือกเส้นทางหลักให้กับทราฟฟิกในโครงข่าย

จะเห็นได้จากปริมาณความจุโดยรวมที่ลดลงของการออกแบบที่พิจารณาถึงการวางความจุใช้งานร่วมกับความจุสำรอง เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรองอย่างเดียว โดยวางเส้นทางใช้งานให้เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด นั้นหมายความว่าปริมาณความจุโดยรวมที่ลดลงนั้นมีผลมาจาก การลดลงของปริมาณความจุสำรอง ที่มีปริมาณการลดลงมากกว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของความจุใช้งาน จึงสรุปได้ว่าวิธีการเลือกเส้นทางใช้งานเป็นตัวกำหนดความจุใช้งานในโครงข่าย และจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการเพื่อรองรับความเสียหาย

2.4 หลักการวัดความอยู่รอดของโครงข่าย

ความอยู่รอดของโครงข่าย คือ ความสามารถที่โครงข่ายยังให้บริการต่อได้เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่าย ความอยู่รอดนั้นสามารถวัดได้ในเทอมของ ค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย (restorability) เป็นดัชนีที่ใช้วัดประสิทธิภาพของวิธีการบูรณะโครงข่ายในลักษณะที่ว่า “เมื่อเกิดความเสียหายที่คาดการณ์ขึ้นแล้ว โครงข่ายจะสามารถบูรณะทราฟฟิกได้เป็นปริมาณมากน้อยเพียงไร” ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายที่เป็นตัววัดความน่าจะเป็นของการเกิดความเสียหายของโครงข่าย เช่น “ในระยะเวลา 1 ปีนั้น มีโอกาสเท่าใดที่เส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างคูโนโคโครงข่ายจะไม่สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลาที่กำหนด” [1]

ค่าสภาพพร้อมใช้งานนั้นมีความแตกต่างกับค่าความเชื่อถือได้ (reliability) ค่าความเชื่อถือได้ของระบบที่เวลาใดๆ คือความน่าจะเป็นที่ระบบจะอยู่ในสภาวะใช้งานได้โดยไม่มีมีความเสียหายเกิดขึ้นเลยในช่วงเวลานั้น เป็นฟังก์ชันไม่เพิ่ม (non-increasing function) ของเวลา แต่ค่าสภาพพร้อมใช้งานนั้นเป็นค่าความน่าจะเป็นที่ระบบจะอยู่ในสภาวะใช้งานได้ที่เวลาใดๆ เป็นค่าวัดที่สภาวะคงตัวของระบบ (steady-state) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอัตราการเสียหาย (failure rate) และอัตราการซ่อมแซม (repair rate) [1] สำหรับระบบที่เมื่อเกิดความเสียหายแล้วไม่มีการซ่อมแซม การวัดค่าความเชื่อถือได้จะเหมือนกับการวัดค่าสภาพพร้อมใช้งาน แต่สำหรับโครงข่ายสื่อสารที่เมื่อ

เกิดความเสียหายและมีการซ่อมแซมนั้น ควรจะนำค่าสภาพพร้อมใช้งานมาเป็นดัชนีชี้วัดความอยู่รอดของโครงข่ายสื่อสารด้วย

ในโครงข่ายที่มีการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายนั้น ค่าสภาพพร้อมใช้งานจะขึ้นอยู่กับความสามารถของการบูรณะด้วย นั่นหมายความว่าทั้งวิธีการสร้างเส้นทางสำรอง และปริมาณความจุสำรองที่วางในโครงข่ายก็เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยตรง ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.4.1 การคำนวณค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย

ค่าความสามารถในการบูรณะ หรือบางครั้งเรียกว่า อัตราการบูรณะ (restoration ratio) เป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณทราฟฟิกที่สามารถบูรณะได้หลังเกิดความเสียหายต่อปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย

อัตราการบูรณะสำหรับรูปแบบความเสียหาย x (R_x) สามารถคำนวณได้จาก

$$R_x = \frac{T_x}{W_x} \quad (2.1)$$

โดยที่ T_x คือปริมาณทราฟฟิกที่สามารถบูรณะได้เมื่อมีความเสียหาย x เกิดขึ้น

และ W_x คือปริมาณทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย x

อัตราการบูรณะของโครงข่าย (R_N) คือค่าเฉลี่ยของอัตราการบูรณะของความเสียหายทุกรูปแบบ กำหนดให้เซต Ω เป็นเซตของรูปแบบความเสียหายทั้งหมดที่มีในโครงข่าย

$$R_N = \sum_{x \in \Omega} \left(\frac{T_x}{W_x} \right) = \sum_{x \in \Omega} \left(\frac{R_x \times T_x}{W_x} \right) \quad (2.2)$$

2.4.2 การคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย

ก่อนที่จะกล่าวถึงการนำค่าสภาพพร้อมใช้งานมาใช้กับโครงข่ายนั้น จะกล่าวถึงหลักการของสภาพพร้อมใช้งานในระบบใดๆก่อน

2.4.2.1 หลักการของค่าสภาพพร้อมใช้งานและค่าสภาพไม่พร้อมใช้งาน

หลักการของค่าสภาพพร้อมใช้งาน

ค่าสภาพพร้อมใช้งาน คือ ค่าความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานได้ที่เวลา t ใดๆ โดยสมมติว่าระบบเริ่มทำงานที่เวลา $t = 0$ ในที่นี้จะหมายถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานในสภาวะคงตัว (steady-state availability) เท่านั้น นั่นคือค่าความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานที่เวลา $t \rightarrow \infty$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของช่วงเวลาที่ระบบทำงาน (uptime) ต่อช่วงเวลาที่พิจารณา (T_{obs}) โดยที่ช่วงเวลาที่พิจารณานั้นต้องมีค่าเข้าใกล้ค่าอนันต์ (infinity) แต่ในระบบที่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นและมีการซ่อมแซมนั้น ค่า (T_{obs}) จะเป็นคาบของเวลาใน 1 รอบตั้งแต่ระบบเริ่มทำงาน แล้วเกิดความเสียหาย จนกระทั่งมีการซ่อมแซมเสร็จสิ้น ดังรูปที่ 2.3 [1] ดังนั้นค่าสภาพพร้อมใช้งาน

(A) จึงขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของเวลาระหว่างระหว่างความเสียหายแต่ละครั้ง (Mean Time To Failure: MTTF) และค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมความเสียหาย (Mean Time To Repair: MTTR) ดังสมการ 2.3

$$A = \frac{\text{uptime}}{T_{\text{obs}}} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.3)$$

โดยที่ $\lambda = \frac{1}{MTTF}$ คืออัตราการเกิดความเสียหาย (failure rate)

และ $\mu = \frac{1}{MTTR}$ คืออัตราการซ่อมแซม



รูปที่ 2.3 เวลาในหนึ่งรอบความเสียหายของระบบที่มีการซ่อมแซมความเสียหาย

หลักการของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งาน (unavailability)

ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งาน (U) เป็นส่วนเสริมให้สมบูรณ์ (complement) ของค่าสภาพพร้อมใช้งาน นั่นคือ $U = 1 - A$ ดังนั้นจากสมการ 2.3 จะได้ว่า

$$U = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.4)$$

ในระบบทั่วไปนั้น ค่า $MTTF$ นั้นจะมีค่ามากกว่า $MTTR$ มาก จึงสามารถประมาณค่า U ได้ดังนี้

$$U \approx \frac{MTTR}{MTTF} = \lambda \times MTTR \quad (2.5)$$

2.4.2.2 ค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย (Network Availability)

การคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายนั้น ไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง เนื่องจากทั้งโครงข่ายไม่ได้อยู่ในสถานะใช้งานหรือสภาวะเสียหายทั้งโครงข่าย แต่สามารถคำนวณจากค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางที่เชื่อมต่อในโครงข่ายนั้น เพื่อบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือในมุมมองของผู้ใช้บริการ [17] เนื่องจากในโครงข่ายมีเส้นทางที่ถูกเชื่อมต่อหลายเส้นทาง การคิดสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายโดยรวมจะพิจารณาจาก

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางที่มีสภาพพร้อมใช้งานน้อยที่สุด (maximum path unavailability)
- ค่าเฉลี่ยของสภาพพร้อมใช้งานของทุกเส้นทางที่เชื่อมต่อในโครงข่าย (average path unavailability)

ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทาง (path availability) ในโครงข่ายที่ไม่มีการบูรณะความเสียหาย

การคิดค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางนั้นมีหลักการเหมือนระบบที่มีอุปกรณ์ต่อกันแบบอนุกรม นั่นคือเส้นทางประกอบด้วยช่วงการเชื่อมต่อหลายๆช่วงเชื่อมต่อกัน ถ้าหากมีช่วงการเชื่อมต่อใดอย่างน้อยหนึ่งช่วงเกิด

ความเสียหาย จะทำให้เส้นทางนั้นไม่สามารถใช้งานได้ [17], [20]

การคำนวณหาค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทาง q (A_q^{path}) ที่ประกอบด้วย n ช่วงการเชื่อมต่อ ในโครงข่ายที่ไม่มี การบูรณะทราฟฟิกเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_q^{path} = \prod_{i=1}^n A_i \approx 1 - \sum_{i=1}^n U_i \quad (2.6)$$

โดยที่ A_i คือ สภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i

และ U_i คือ สภาพไม่พร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i ซึ่งจะได้ว่า ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางประมาณได้เป็นผลบวกของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อที่เส้นทางนั้นผ่าน ดังสมการ (2.7)

$$U_q^{path} \approx \sum_{i=1}^n U_i \quad (2.7)$$

ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางในโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายระดับช่วงการเชื่อมต่อ

โครงข่ายที่มีการบูรณะนั้น จะมีค่าสภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อสูงกว่าในโครงข่ายที่ไม่มี การบูรณะ เพราะ มีกระบวนการบูรณะทำให้เสมือนว่าช่วงการเชื่อมต่อที่เสียหายนั้นยังทำการเชื่อมต่ออยู่เหมือนไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น และจะเรียกค่าสภาพพร้อมใช้งานนี้ว่า *ค่าสภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อสมมูล (equivalent span availability)* ซึ่งช่วงการเชื่อมต่อจะอยู่ในสถานะให้บริการ (up state) เมื่อมันไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดความเสียหายแต่ก็สามารถบูรณะทราฟฟิกได้ [20] เส้นทางใช้งานจะสามารถใช้งานได้ทันทีที่การบูรณะเสร็จสิ้น โดยไม่ต้องรอให้ช่วงการเชื่อมต่อในท่อยสายซ่อมแซมเสร็จ

สภาพไม่พร้อมใช้งานสมมูลของช่วงการเชื่อมต่อสมมูล i (U_i^*) คือความน่าจะเป็นที่ช่วงการเชื่อมต่อ i จะเกิดความเสียหายและไม่มี การบูรณะ ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของโครงข่ายในการบูรณะความเสียหาย เช่น ถ้าหากโครงข่ายสามารถบูรณะทราฟฟิกในช่วงการเชื่อมต่อ i ได้ทั้งหมดหรือมีอัตราการบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ จากสมการ (2.5) ทำให้ได้ค่า $U_i^* \approx \lambda_i \times tr_i$ โดยที่ λ_i คืออัตราการเกิดความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ i และ tr_i คือเวลาที่ใช้ในการบูรณะทราฟฟิกทั้งหมดที่ถูกผลกระทบจากความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ i

แต่ในบางครั้งโครงข่ายไม่สามารถบูรณะทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ i ได้ทั้งหมด ค่า (U_i^*) จึงขึ้นอยู่กับอัตราการบูรณะด้วย งานวิจัย [20] เสนอการคำนวณหาค่า U_i^* เป็นไปตามสมการ (2.8)

$$U_i^* = U_i \cdot \sum_{f=1,2,3} \underbrace{p(\text{state } f - 1)}_{\substack{\text{physical unavailability} \\ \text{of others span}}} \underbrace{\left[\underbrace{(\text{restoration time exposure}) \cdot R_f}_{\substack{\text{time exposure (restorable fraction)}}} + \underbrace{1 \cdot (1 - R_f)}_{\substack{\text{capacity exposure} \\ \text{(unrestorable fraction)}}} \right]}_{\text{exposure function}} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่า f ในสมการหมายถึงลำดับชั้น (order) ของความเสียหายในโครงข่าย หรือจำนวนของช่วงการเชื่อมต่อที่
เกิดความเสียหายพร้อมกัน และค่า R_f คือค่าเฉลี่ยของอัตราการบูรณะของรูปแบบความเสียหาย f

ในสมการ (2.8) พิจารณารูปแบบความเสียหายของโครงข่ายที่มีทั้งความเสียหายเพียงแค่ช่วงการเชื่อมต่อเดียว
สองช่วงการเชื่อมต่อ และสามช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายพร้อมกัน ซึ่งในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งช่วงการ
เชื่อมต่อเกิดความเสียหายพร้อมกัน อาจจะทำให้โครงข่ายไม่สามารถทำการบูรณะทราฟฟิกทั้งหมดได้ เนื่องจากมี
ความจุสำรองไม่เพียงพอ เช่น ออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับเพียงแค่ช่วงการเชื่อมต่อเดียวเกิดความเสียหาย
เท่านั้น ในกรณีนี้จะทำให้ R_2 และ R_3 มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นั่นคือมีทั้งทราฟฟิกส่วนที่สามารถบูรณะได้ (restorable
fraction) และทราฟฟิกส่วนที่ไม่สามารถบูรณะได้ (unrestorable fraction) ซึ่งส่วนของทราฟฟิกที่สามารถบูรณะ
ได้นั้นจะทำให้ U_i^* มีค่าขึ้นกับเวลาที่โครงข่ายใช้ในการบูรณะทราฟฟิก ในงานวิจัย [20] พิจารณาค่าสภาพไม่พร้อม
ใช้งานที่เกิดจากเหตุการณ์ที่สองช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายพร้อมกัน สำหรับโครงข่ายที่มีวงความจุสำรอง
เพื่อรองรับความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อเดียวเท่านั้น ทำให้ R_1 มีค่าเป็นศูนย์ และการเกิดความเสียหายของ
แต่ละช่วงการเชื่อมต่อเป็นอิสระต่อกัน และเนื่องจากเวลาในการบูรณะเส้นทางมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบเวลาที่ใช้ในการ
ซ่อมแซมความเสียหาย ดังนั้นสภาพไม่พร้อมใช้งานที่เกิดจากทราฟฟิกส่วนที่บูรณะได้จึงไม่น่ามาคิด ดังนั้นจาก
สมการ (2.8) จะหาค่า U_i^* ได้ดังนี้ [1]

$$U_i^* = U_i \cdot \sum_{j \in S | i \neq j} U_j \cdot (1 - R_2(i, j)) \quad (2.9)$$

โดยที่ S คือเซตของช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่าย

และ $R_2(i, j)$ คือ อัตราการบูรณะของทราฟฟิกที่เกิดผลกระทบของช่วงการเชื่อมต่อ i และ j เสียหายพร้อมกัน
สมมติให้ $N(i)$ คือ ทราฟฟิกในช่วงการเชื่อมต่อ i ที่ไม่สามารถบูรณะได้ จะได้ว่า

$$R_2(i, j) \equiv 1 - \frac{N(i, j)}{w_i + w_j} = 1 - \frac{N_i + N_j}{w_i + w_j} \quad (2.10)$$

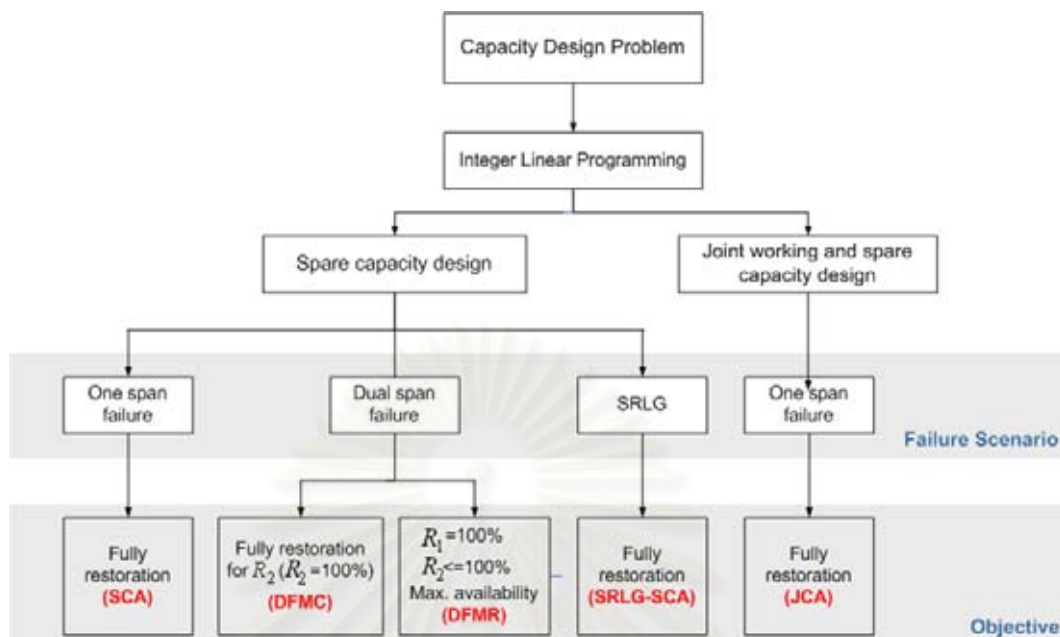
นั่นคืออัตราการบูรณะมีผลโดยตรงต่อค่าสภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ

การคำนวณค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางในโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายนั้นทำได้เช่นเดียวกับ
โครงข่ายที่ไม่มีการบูรณะ นั่นคือสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางประมาณเป็นผลบวกของสภาพไม่พร้อมใช้งานสม
มูลของช่วงการเชื่อมต่อที่เส้นทางนั้นผ่าน

$$U_q^{path} \approx \sum_{i=1}^n U_i^* \quad (2.11)$$

2.4.3 ปัญหาการวางแผนความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายรูปแบบต่างๆ

ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างวิธีการออกแบบการวางแผนความจุของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความอยู่
รอดในโครงข่ายที่ใช้การบูรณะระดับช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งแบ่งรูปแบบปัญหาที่พิจารณาแสดงในรูปที่ 2.4 ได้แก่



รูปที่ 2.4 ปัญหาการออกแบบการวางความจุ

- การออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง ให้มีค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองต่ำที่สุด โดยกำหนดให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาเพียงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัย [1], [14], [15], [16], [19] เรียกการออกแบบนี้ว่า Spare Capacity Assignment (SCA)
- การออกแบบทั้งการวางความจุใช้งานควบคู่กับการวางความจุสำรอง ให้มีค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมต่ำที่สุด โดยกำหนดให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาเพียงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัย [1], [10], [11], [14] เรียกการออกแบบนี้ว่า Joint Capacity Assignment (JCA)
- การออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง ให้มีค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองต่ำที่สุด โดยกำหนดให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาสองข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายใดๆพร้อมกัน ซึ่งในงานวิจัย [16], [17] เรียกการออกแบบนี้ว่า Dual-Failure Minimum Capacity Design (DFMC)
- การออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง โดยคำนึงถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานในการออกแบบ ซึ่งกำหนดให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์สำหรับเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย และให้มีอัตราบูรณะเมื่อมีสองข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายใดๆพร้อมกันมีค่ามากที่สุด เมื่อมีต้นทุนจำกัดในการวางความจุสำรอง ซึ่งในงานวิจัย [16], [17] เรียกการออกแบบนี้ว่า Dual-Failure Maximum Restorability Design (DFMR)
- การออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง ให้มีค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองต่ำที่สุด โดยกำหนดให้มีอัตรา

บรูณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่สองชายเชื่อมโยงที่อยู่ในท่อร้อยสายเดียวกันเกิดความเสียหายพร้อมกัน ซึ่งในงานวิจัย [1], [19] เรียกการออกแบบนี้ว่า Share Risk Link Group - Spare Capacity Design (SLRG-SCA)

2.4.3.1 การออกแบบความจุสำรองเมื่อพิจารณาหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหาย (SCA)

วิธีนี้เสนอโดย Herzberg และ Bye [9] เป็นการออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรองจากโครงข่ายที่มีการวางความจุใช้งานไว้ก่อน โดยการวางความจุใช้งานนั้นคิดจากการกำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อใดๆจะเท่ากับผลรวมของปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่วิ่งอยู่ในช่วงการเชื่อมต่อนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ :

- S เซตของช่วงการเชื่อมต่อทั้งหมดในโครงข่าย
- C_j ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยความจุของช่วงการเชื่อมต่อ j
- w_j ปริมาณความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อ j
- P_i เซตของเส้นทางสำรองทั้งหมดสำหรับบรูณะช่วงการเชื่อมต่อ i
- $\delta_{i,j}^p$ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าเส้นทางสำรองที่ p ในการบรูณะช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ j ไม่เช่นนั้น มีค่าเท่ากับ 0
- f_i^p ปริมาณทราฟฟิกที่ถูกบรูณะในเส้นทางสำรองที่ p ของการบรูณะช่วงการเชื่อมต่อ i
- s_j ปริมาณของความจุสำรองที่วางในช่วงการเชื่อมต่อ j

$$\text{Minimize } \sum_{j \in S} C_j \cdot s_j \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) คือ เพื่อวางความจุสำรองให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ตามสมการ (2.12) และมีเงื่อนไขบังคับ (constraints) ต่างๆดังนี้

$$\sum_{p \in P_i} f_i^p = w_i \quad \forall i \in S \quad (2.13)$$

$$s_j \geq \sum_{p \in P_i} \delta_{i,j}^p \cdot f_i^p \quad \forall (i, j) \in S^2, i \neq j \quad (2.14)$$

เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.13) มีหมายความว่าทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบเมื่อเกิดความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อจะต้องได้รับการบรูณะทั้งหมด ส่วนสมการ (2.14) บังคับว่าจะต้องมีความจุสำรองเพียงพอในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อสำหรับรองรับเส้นทางสำรองทุกเส้นทางที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อนั้น สำหรับการบรูณะความเสียหายของทุกช่วงการเชื่อมต่อ

2.4.3.2 การออกแบบความจุใช้งานร่วมกับความจุสำรองเมื่อพิจารณาหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหาย (JCA)

เนื่องจากเส้นทางใช้งานที่ต่างกันนั้นมีผลโดยตรงต่อปริมาณความจุสำรองที่ต้องการ ดังนั้นการพิจารณาการวางแผนความจุใช้งานร่วมกับวางแผนความจุสำรองควบคู่กันนั้นจะทำให้ปริมาณความจุโดยรวมลดลง วิธี JCA ถูกนำเสนอโดย Clouqueur และ Grover [16] ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมจากวิธีการจำลอง SCA ดังนี้

- D เซตของคูโนดที่มีความต้องการส่งทราฟฟิกมากกว่าศูนย์
- d_r ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของคูโนด r
- Q_r เซตของเส้นทางใช้งานที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับรองรับความต้องการของคูโนด r
- $\zeta_j^{r,q}$ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าเส้นทางใช้งานที่ q ของคูโนด r ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ j
- $g^{r,q}$ ปริมาณทราฟฟิกในเส้นทางใช้งานที่ q สำหรับความต้องการของคูโนด r

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของการออกแบบ JCA เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการวางแผนความจุทั้งหมดในโครงข่ายมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการ (2.15)

$$\text{Minimize } \sum_{j \in S} C_j (w_j + s_j) \quad (2.15)$$

และมีเงื่อนไขบังคับตามสมการ (2.13), (2.14) และมีเงื่อนไขเพิ่มเติมดังนี้

$$\sum_{q \in Q_r} g^{r,q} = d_r \quad \forall r \in D \quad (2.16)$$

$$\sum_{r \in D} \sum_{q \in Q_r} \zeta_j^{r,q} \cdot g^{r,q} = w_j \quad \forall j \in S \quad (2.17)$$

เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.16) หมายถึง เส้นทางใช้งานของคูโนด r จะต้องรองรับความต้องการทราฟฟิกของคูโนด r ได้ทั้งหมด ส่วนในสมการ (2.17) เป็นการบังคับว่าปริมาณความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อใดๆ ต้องมีเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกก่อนเกิดความเสียหายของทุกคูโนดที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ

2.4.3.3 การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อใดๆเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ (DFMC)

ในวิธี SCA เป็นการออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายของหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อ แต่ในความเป็นจริงนั้นมีความเป็นไปได้ที่ช่วงการเชื่อมต่อช่วงอื่นในโครงข่ายจะเกิดความเสียหาย ในขณะที่ช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายก่อนหน้ายังซ่อมแซมไม่เสร็จ หรืออีกสาเหตุหนึ่งคือ ช่วงการเชื่อมต่อสองช่วงนี้อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายร่วมกัน ดังนั้นความจุสำรองที่วางแผนเพื่อรองรับความเสียหายเพียงแค่ช่วงการเชื่อมต่อเดียว ($R_1 = 100\%$) จึงไม่เพียงพอในการบูรณะทราฟฟิกทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ค่าไม่สภาพพร้อมใช้งานมีค่าสูง ในงานวิจัย [16], [17] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดในการวางแผนความจุสำรอง เพื่อให้โครงข่ายสามารถบูรณะ

ทราบฟลักทั้งหมดที่ถูกผลกระทบจากเหตุการณ์ที่สองช่วงการเชื่อมต่อใดๆในโครงข่ายเกิดความเสียหายพร้อมกัน เมื่อกำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด

ในการจำลองปัญหาที่มีพารามิเตอร์ที่ต้องใช้เพิ่มเติมจากการจำลองวิธี SCA คือ

$f_{i,j}^p$ ปริมาณทราบฟลักที่ทำการบูรณะในเส้นทางสำรองที่ p ของการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อ i เมื่อช่วงการเชื่อมต่อ i และ j เกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน

$$\text{Minimize } \sum_{j \in S} C_j \cdot s_j \quad (2.18)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของการออกแบบนั้นเหมือนวิธี SCA คือ เสียค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองน้อยที่สุด และมีเงื่อนไขบังคับต่างๆดังนี้

$$\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p = w_i \quad \forall (i, j) \in s^2, i \neq j \quad (2.19)$$

$$f_{i,j}^p \leq C_\infty (1 - \delta_{i,j}^p) \quad \forall (i, j) \in s^2, i \neq j, \forall p \in P_i \quad (2.20)$$

$$\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p \cdot \delta_{i,k}^p + \sum_{p \in P_j} f_{j,i}^p \cdot \delta_{j,k}^p \leq s_k \quad \forall (i, j, k) \in s^3, i \neq j, i \neq k, j \neq k \quad (2.21)$$

สมการ (2.19) เป็นข้อกำหนดว่าจะต้องบูรณะทราบฟลักได้ทั้งหมดในทุกกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อใดๆเกิดความเสียหาย เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.20) ใช้ C_∞ เป็นค่าคงที่ที่มีค่ามาก เพื่อรับประกันว่าช่วงการเชื่อมต่อ j จะสามารถทำการบูรณะทราบฟลักได้ถ้าช่วงการเชื่อมต่อ j ไม่ได้เกิดความเสียหาย แต่จะไม่สามารถใช้ในการบูรณะทราบฟลักของช่วงการเชื่อมต่อ i ได้ถ้ามันเกิดความเสียหายพร้อมกับช่วงการเชื่อมต่อ i ส่วนสมการ (2.21) บังคับว่าแต่ละช่วงการเชื่อมต่อจะต้องมีความจุสำรองเพียงพอที่จะรองรับเมื่อมีสองช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายได้

2.4.3.4 การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อใดๆเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะมากที่สุด (DFMR)

การวางความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายของสองช่วงการเชื่อมต่อ นั้นอาจจะทำได้เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อไม่สามารถทำให้ค่า $R_2 = 100\%$ ได้ จึงมีการเสนอวิธีการวางความจุสำรองเมื่อมีงบประมาณจำกัด โดยคำนึงถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายด้วย [16], [17] ซึ่งสำหรับเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายนั้น จะให้ทราบฟลักที่ถูกผลกระทบได้รับการบูรณะทั้งหมด ($R_1 = 100\%$) ส่วนสำหรับเหตุการณ์ที่สองข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายพร้อมกันนั้น จะพิจารณาให้สภาพไม่พร้อมใช้งานมีค่าต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นจากสมการ (2.9) และจากสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการให้ค่าไม่พร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อมีค่าต่ำ ต้องให้อัตราการบูรณะมีค่าสูง นั่นคือ ทำให้จำนวนทราบฟลักที่ไม่สามารถบูรณะได้จากความเสียหายมีน้อยที่สุด

พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดเพิ่มสำหรับวิธี DFMR คือ

B งบประมาณที่กำหนดในการวางความจุสำรอง

$N(i, j)$ ปริมาณทรานฟิสิกที่ไม่สามารถบูรณะได้ เมื่อช่วงการเชื่อมต่อ i และ j เกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของวิธี DFMR คือ

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in S^2, i \neq j} N(i, j) \quad (2.22)$$

และมีเงื่อนไขบังคับ ดังนี้

$$\sum_{p \in P_i} f_i^p = w_i \quad \forall i \in S \quad (2.23)$$

$$N(i, j) = w_i + w_j - \left(\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p + \sum_{p \in P_j} f_{j,i}^p \right) \quad \forall (i, j) \in s^2, i \neq j \quad (2.24)$$

$$\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p \leq w_i \quad \forall (i, j) \in s^2, i \neq j \quad (2.25)$$

$$f_{i,j}^p \leq C_\infty (1 - \delta_{i,j}^p) \quad \forall (i, j) \in s^2, i \neq j, \forall p \in P_i \quad (2.26)$$

$$\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p \cdot \delta_{i,k}^p \leq s_k \quad \forall (i, k) \in s^2, i \neq k \quad (2.27)$$

$$\sum_{p \in P_i} f_{i,j}^p \cdot \delta_{i,k}^p + \sum_{p \in P_j} f_{j,i}^p \cdot \delta_{j,k}^p \leq s_k \quad \forall (i, j, k) \in s^3, i \neq j, i \neq k, j \neq k \quad (2.28)$$

$$\sum_{k \in S} C_k \cdot s_k \leq B \quad (2.29)$$

เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.23) คือการให้ $R_1 = 100\%$ สำหรับทุกหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหาย สมการ (2.24) เป็นการกำหนดค่าของ $N(i, j)$ ให้เท่ากับปริมาณทรานฟิสิกที่ไม่สามารถบูรณะได้ในกรณีเกิดความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ i และ j ใดๆ เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.25) เป็นการกำหนดว่าปริมาณทรานฟิสิกที่ได้รับการบูรณะกรณีสองช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายต้องมีค่าไม่เกินความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อที่เกิดความเสียหายนั้น และเงื่อนไขบังคับในสมการ (2.26) มีความหมายเช่นเดียวกับสมการ (2.20) ส่วนสมการ (2.27) บังคับว่าความจุสำรองต้องมีเพียงพอที่จะรองรับทรานฟิสิกจากหนึ่งช่วงการเชื่อมต่อเสียหาย เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.28) เป็นการกำหนดปริมาณความจุสำรองในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อเช่นกัน แต่มีจุดประสงค์สำหรับรองรับทรานฟิสิกจากสองช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายแม้จะไม่สามารถบูรณะได้ทั้งหมด เงื่อนไขบังคับสุดท้ายในสมการ (2.29) กำหนดว่าค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองต้องไม่เกินงบประมาณที่กำหนดไว้

2.4.3.5 การออกแบบความจุสำรองเพื่อรองรับกรณีที่สองช่วงการเชื่อมต่อที่มีความเสี่ยงร่วมกันเกิดความเสียหาย ให้มีอัตราบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ (SLRG-SCA)

วิธีนี้พิจารณารูปแบบความเสียหายที่สองช่วงการเชื่อมต่อที่เชื่อมกับโหนดเดียวกันมีความเสี่ยงต่อความเสียหายร่วมกัน เช่น วางอยู่บนท่อร้อยสายเดียวกัน เป็นการออกแบบเฉพาะการวางความจุสำรอง โดยให้เส้นทางใช้งาน

เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเหมือนกับวิธี SCA และกำหนดให้ต้องบูรณะทรพฟีกจากความเสียหายในรูปแบบดังกล่าวได้ทั้งหมด

กำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องใช้เพิ่มเติม ดังนี้

$\Gamma_{h,i}$ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าช่วงการเชื่อมต่อ h และ i มีความเสี่ยงต่อความเสียหายร่วมกัน

ฟังก์ชันจุดประสงค์เหมือนวิธี SCA คือให้มีค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองน้อยที่สุด และมีเงื่อนไขบังคับเพิ่มเติมจากวิธี SCA ดังนี้

$$\sum_{p \in P_i} f_{h,i}^p = w_i \quad \forall (h,i) \in S^2 : \Gamma_{h,i} = 1, h \neq i \quad (2.30)$$

$$\sum_{p \in P_i : \delta_{i,j}^p = 1} f_{h,i}^p = 0 \quad \forall (h,i) \in S^2 : \Gamma_{h,i} = 1, h \neq i \quad (2.31)$$

$$\sum_{p \in P_i} f_{h,i}^p \cdot \delta_{i,j}^p + \sum_{p \in P_h} f_{i,h}^p \cdot \delta_{h,j}^p \leq s_k \quad \forall (h,i,j) \in S^3 : \Gamma_{h,i} = 1, h \neq j, j \neq i, i \neq h \quad (2.32)$$

เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.30) คือการให้มีเส้นทางบูรณะที่เพียงพอในการรองรับทรพฟีกจากความเสียหายได้ครบทั้งหมด เงื่อนไขบังคับในสมการ (2.31) เป็นข้อห้ามว่า สำหรับช่วงการเชื่อมต่อใดที่เกิดความเสียหายแล้ว ไม่ให้ใช้เส้นทางบูรณะที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่ออื่นที่เกิดความเสียหายพร้อมกับช่วงการเชื่อมต่ออื่น และสมการ (2.32) เป็นการกำหนดให้แต่ละช่วงการเชื่อมต่อมีความจุสำรองเพียงพอสำหรับรองรับทรพฟีกจากความเสียหาย

2.4.4 วิธีการวางความจุที่นำเสนอ

วิธีการวางความจุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียด คือ

- รูปแบบความเสียหายที่พิจารณา

การออกแบบคำนึงถึงรูปแบบความเสียหายที่เหมือนวิธี SRLG คือหลายช่วงการเชื่อมต่อบนท่อร้อยสายเดียวกันมีความเสี่ยงต่อความเสียหายร่วมกัน แต่จะแตกต่างจากวิธี SRLG-SCA ตรงที่มีการวางความจุใช้งานควบคู่กับการวางความจุสำรอง

- จุดประสงค์ของการออกแบบ

เพื่อให้โครงข่ายมีค่าใช้จ่ายจากการวางความจุน้อยที่สุด โดยที่ค่าสภาพพร้อมใช้งานมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ และศึกษาแนวโน้มของการชดเชยข้อดีข้อเสีย (trade-off) ระหว่างค่าใช้จ่ายและค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายด้วย โดยแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานนั้นเลียนแบบมาจากวิธี DFMR แต่มีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับรูปแบบความเสียหายที่พิจารณา ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทถัดไป

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเรียกว่าวิธีที่นำเสนอชื่อว่า SRLG-JCA-DCA (Share Risk Link Group - Joint Capacity Assignment based on Dilemma : Cost vs. Availability)

บทที่ 3

การจำลองและแก้ไขปัญหการวางความจุที่นำเสนอ

ในบทนี้ได้นำหลักการคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายที่กล่าวถึงจากบทที่แล้วมาใช้เป็นข้อกำหนดในการวางความจุ โดยนำมาประยุกต์ใช้กับรูปแบบความเสียหายแบบ SRLG ในส่วนต้นนั้นเป็นการจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี SRLG-JCA-DCA และส่วนถัดไปได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาคด้วยขั้นตอนวิธีอิวิริสติก

3.1 ค่าสภาพพร้อมใช้งานสำหรับโครงข่ายที่พิจารณาความเสียหายแบบ SRLG

ในการคำนวณสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางใดๆนั้น ต้องเริ่มคิดจากองค์ประกอบย่อยที่สุดในโครงข่ายก่อน นั่นคือ ท่อร้อยสายในระดับชั้นกายภาพของโครงข่าย

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานของท่อร้อยสาย (physical conduit availability)

จากหลักการคำนวณค่าสภาพพร้อมใช้งานในบทที่ 2 จะได้ว่าค่าสภาพพร้อมใช้งานของท่อร้อยสาย e (A_e^{phy}) คำนวณได้จาก

$$A_e^{phy} = \frac{MTTF_e}{MTTF_e + MTTR_e} = \frac{\mu_e}{\lambda_e + \mu_e} \quad (3.1)$$

โดยที่ λ_e และ μ_e เป็นอัตราความเสียหายและอัตราการซ่อมแซมของท่อร้อยสาย e ตามลำดับ และจากสมการ (2.5) ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของท่อร้อยสาย e (U_e^{phy}) ประมาณได้เป็น

$$U_e^{phy} \approx \frac{MTTR_e}{MTTF_e} = MTTR_e \times \lambda_e \quad (3.2)$$

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ (logical span availability)

ก่อนที่จะหาค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางใดๆนั้น ต้องทราบค่าสภาพพร้อมใช้งานของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อที่เส้นทางนั้นผ่านก่อน จากที่กล่าวมาแล้วว่าแบบจำลองที่พิจารณานั้นคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างท่อร้อยสายในชั้นกายภาพและช่วงการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะ เนื่องจากหนึ่งช่วงการเชื่อมต่ออาจเดินทางผ่านท่อร้อยสายมากกว่าหนึ่งท่อ และช่วงการเชื่อมต่อจะสามารถใช้งานได้ ก็ต่อเมื่อไม่มีท่อร้อยสายใดที่ช่วงการเชื่อมต่อั้นเดินทางผ่านเกิดความเสียหาย ดังนั้น การคำนวณสภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่ายสามารถคิดได้เช่นเดียวกับในระบบที่มีอุปกรณ์ต่อกันแบบอนุกรม และเนื่องจากการเกิดความเสียหายของแต่ละท่อร้อยสายเป็นอิสระต่อกัน สภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อจึงคำนวณได้ดังสมการ

$$A_i = \prod_{e \in L(i)} A_e^{phy} \approx 1 - \sum_{e \in L(i)} U_e^{phy} \quad (3.3)$$

โดยที่ A_i คือ สภาพพร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i

$L(i)$ คือ เซตของท่อร้อยสายทั้งหมดที่ช่วงการเชื่อมต่อ i เดินทางผ่าน

ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i (U_i) จึงสามารถประมาณได้เป็นผลบวกของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของแต่ละท่อร้อยสายในเซต $L(i)$ ดังสมการ

$$U_i \approx \sum_{e \in L(i)} U_e^{phy} \quad (3.4)$$

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานสมมูลของช่วงการเชื่อมต่อ (equivalent logical span availability)

รูปแบบความเสียหายแบบ SRLG นั้น เมื่อเกิดความเสียหายของท่อร้อยสายใดแล้ว ทุกช่วงการเชื่อมต่อที่ผ่านท่อร้อยสายนั้นจะเกิดความเสียหายทั้งหมด และกำหนดให้ไม่มีเหตุการณ์ที่ท่อร้อยสายมากกว่าหนึ่งท่อจะเกิดความเสียหายขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นจากสมการ (2.9) สามารถคำนวณหาค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานสมมูลของช่วงการเชื่อมต่อ i ได้จาก

$$U_i^* \approx \sum_{e \in L(i)} U_e^{phy} (1 - R_{i,e}) = \sum_{e \in L(i)} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{w_i} \right) \quad (3.5)$$

นั่นคือค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานสมมูลของช่วงการเชื่อมต่อขึ้นอยู่กับความสามารถในการบูรณะความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อ

$$R_{i,e} = \frac{w_i - N_{i,e}}{w_i} \quad (3.6)$$

โดยที่ $R_{i,e}$ คืออัตราการบูรณะของช่วงการเชื่อมต่อ i เมื่อท่อร้อยสาย e เกิดความเสียหาย และ $N_{i,e}$ เป็นจำนวนทราฟฟิกที่ไม่สามารถบูรณะได้ของช่วงการเชื่อมต่อ i เมื่อท่อร้อยสาย e เกิดความเสียหาย

- ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทาง

ค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทาง q ที่เดินทางผ่านช่วงการเชื่อมต่อในเซต $S(q)$ สามารถประมาณได้จาก

$$U_q \approx \sum_{i \in S(q)} U_i^* \approx \sum_{i \in S(q)} \sum_{e \in L(i)} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{w_i} \right) \quad (3.7)$$

3.2 การจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธี SRLG-JCA-DCA

วิธี SRLG-JCA-DCA นั้นเป็นการพิจารณาค่าต้นทุนในการวางความจุและสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายพร้อมกัน นั่นคือเป็นการหาค่าเหมาะที่สุดแบบสองจุดประสงค์ (bi-objective optimization) ซึ่งการหาผลเฉลยของปัญหาแบบนี้เป็นการหาจุดที่เรียกว่าผลเฉลยประสิทธิภาพ (efficient solution) สมมติให้ Z_1 และ Z_2 เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา ผลเฉลยที่ได้จะเป็นผลเฉลยประสิทธิภาพถ้าหากการปรับปรุงจุดประสงค์ใดจุดประสงค์หนึ่งจำเป็นต้องทำให้อีกจุดประสงค์หนึ่งแย่ลงด้วย วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบสองจุดประสงค์ คือกำหนดให้ Z_1 หรือ Z_2 เพียงฟังก์ชันใดฟังก์ชันหนึ่งเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา เช่นเดียวกับการหาค่าเหมาะที่สุดแบบจุดประสงค์เดียว และให้อีกฟังก์ชันหนึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตในเงื่อนไขบังคับ และเปลี่ยนแปลงค่าของเขตในเงื่อนไขบังคับเพื่อหาเขตของผลเฉลย สำหรับในกรณีปัญหาการวางความจุของโครงข่าย

นั้น เพื่อที่จะหาแนวโน้มของการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายและค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย จะกำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ คือ ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมของการวางความจุใช้งานและความสำรองมีค่าต่ำที่สุด และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่าย ซึ่งเป็นการรับประกันว่าค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางที่มีค่าสภาพพร้อมใช้งานน้อยที่สุดในโครงข่ายจะมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้

พารามิเตอร์ที่เป็นอินพุทของแบบจำลอง ได้แก่

- E เซตของท่อย้อยสายทางกายภาพทั้งหมดในโครงข่าย
- I เซตของช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่าย
- D เซตของคูโนดที่มีความต้องการสงทราฟฟีกมากกว่าศูนย์
- U_e^{phy} ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของท่อย้อยสาย e
- U_G ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานที่รับประกันว่าทุกเส้นทางจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานเกินค่า U_G
- C_j ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยความจุของช่วงการเชื่อมต่อ j
- $\mu_{i,e}$ มีค่าเป็น 1 ถ้าช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่านท่อย้อยสาย e
ไม่เช่นนั้น มีค่าเป็น 0
- d_r ปริมาณความต้องการทราฟฟีกของคูโนด r
- Q_r เซตของเส้นทางใช้งานที่เป็นไปได้สำหรับรองรับความต้องการของคูโนด r
ซึ่งแต่ละเส้นทางต้องไม่มีช่วงการเชื่อมต่อใดที่ผ่านท่อย้อยสายเดียวกัน
- η_i^q มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าเส้นทางใช้งานที่ q ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ i
- $P_{i,e}$ เซตของเส้นทางบูรณะที่เป็นไปได้สำหรับการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อ i เมื่อท่อย้อยสาย e เกิดความเสียหาย
ซึ่งจะต้องไม่ผ่านช่วงการเชื่อมต่ออื่นในท่อย้อยสาย e
- $\delta_{i,j}^p$ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าเส้นทางบูรณะที่ p สำหรับการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ j
ไม่เช่นนั้น มีค่าเป็น 0

และตัวแปร (variables) ที่เป็นผลเฉลย ได้แก่

- f_i^p ปริมาณทราฟฟีกที่ถูกบูรณะในเส้นทางสำรองที่ p ของการบูรณะช่วงการเชื่อมต่อ i
- g_r^q ปริมาณทราฟฟีกที่ผ่านเส้นทางใช้งานที่ q สำหรับรองรับความต้องการของคูโนด r
- $N_{i,e}$ ปริมาณทราฟฟีกที่ไม่สามารถบูรณะได้ของช่วงการเชื่อมต่อ i เมื่อท่อย้อยสาย e เกิดความเสียหาย
- w_j ความจุใช้งานที่ต้องวางลงในช่วงการเชื่อมต่อ j
- s_j ความจุสำรองที่ต้องวางลงในช่วงการเชื่อมต่อ j

โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์ตามสมการ (3.8)

$$\text{Minimize } \sum_{j \in I} C_j (w_j + s_j) + U_{ave}^{path} \quad (3.8)$$

และมีเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\sum_{q \in Q_r} g_r^q = d_r \quad \forall r \in D \quad (3.9)$$

$$\sum_{r \in D} \sum_{q \in Q_r} g_r^q \eta_j^q \leq w_j \quad \forall j \in I, \forall r \in D \quad (3.10)$$

$$\sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \leq w_i \mu_{i,e} \quad \forall i \in I, \forall e \in E \quad (3.11)$$

$$N_{i,e} = w_i \mu_{i,e} - \sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \quad \forall i \in I, \forall e \in E \quad (3.12)$$

$$\sum_{q \in Q_r} \frac{g_r^q}{d_r} \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{w_i} \right) \eta_i^q \mu_{i,e} \leq U_G \quad \forall r \in D \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \delta_{i,j}^p \mu_{i,e} \leq S_j \quad \forall k \in I, \forall e \in E \quad (3.14)$$

$$U_{ave}^{path} = \frac{\left(\sum_{r \in D} \sum_{q \in Q_r} (g_r^q / d_r) \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{w_i} \right) \eta_i^q \mu_{i,e} \right)}{|D|} \quad (3.15)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ คือทำให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ได้ประโยชน์จากการวางความจุสูงสุด คือทำให้ค่าเฉลี่ยของสภาพพร้อมใช้งานของทุกเส้นทาง (U_{ave}^{path}) มีค่าต่ำที่สุดจากความจุที่วางในโครงข่าย ส่วนเงื่อนไขบังคับสมการ (3.9) หมายถึง ปริมาณทราฟฟิกในทุกเส้นทางใช้งานของคู่โหนดใดๆรวมกัน จะต้องเท่ากับปริมาณความต้องการส่งทราฟฟิกของคู่โหนดนั้น ส่วนในสมการ (3.10) เป็นการบังคับว่าปริมาณความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อใดๆ ต้องมีเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกก่อนเกิดความเสียหายของทุกคู่โหนดที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ นั้น สมการ (3.11) ระบุว่าสำหรับทุกช่วงการเชื่อมต่อในเครือข่ายที่เกิดความเสียหาย ผลรวมของปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับการบูรณะจะต้องไม่เกินปริมาณทราฟฟิกใช้งานที่ถูกผลกระทบจากความเสียหาย ในสมการ (3.12) เป็นการหาค่าปริมาณทราฟฟิกที่ไม่ได้รับการบูรณะเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานสมมูลของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อ เงื่อนไขบังคับในสมการ (3.13) ระบุว่าทุกเส้นทางใช้งานของการเชื่อมต่อคู่โหนดจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่รับประกันไว้ (guaranteed unavailability: U_G) เทอมทางซ้ายมือของสมการ (3.13) เป็นการคำนวณค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของแต่ละเส้นทางการเชื่อมต่อ ซึ่งหนึ่งการเชื่อมต่อของแต่ละคู่โหนดอาจจะประกอบด้วยเส้นทางย่อยหลายๆเส้นทาง เพราะไม่ได้มีการกำหนดเส้นทางใช้งานว่าจะต้องเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ดังนั้นการคำนวณเส้นทางใช้งานของการเชื่อมต่อคู่โหนดใดๆสามารถหาจากผลรวมของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของแต่ละเส้นทางย่อย ซึ่งแต่ละเส้นทางย่อยจะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (weight value) ที่หากปริมาณทราฟฟิกที่วิ่งอยู่ในเส้นทางย่อยนั้นเทียบกับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ต้องส่งระหว่างคู่โหนด และเงื่อนไขบังคับในสมการ (3.14) เป็นการกำหนดปริมาณความจุสำรองในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับทุกเส้นทางบูรณะที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อ นั้น สุดท้ายในสมการ (3.15) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของสภาพพร้อมใช้งานของทุกเส้นทางการเชื่อมต่อในโครงข่าย

ในการหาเซตของผลเฉลยนั้นทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่า U_G ในเงื่อนไขบังคับที่ (3.13) และหาผลเฉลยที่หาค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมน้อยที่สุดตามที่ระบุไว้ในฟังก์ชันจุดประสงค์ สำหรับแต่ละค่า U_G ที่กำหนด

3.2.1 แนวทางการแก้ปัญหาของวิธี SRLG-JCA-DCA

อย่างไรก็ตามจากแบบจำลองวิธี SRLG-JCA-DCA เป็นการออกแบบการวางความจุใช้งานควบคู่กับการวางความจุสำรอง ซึ่งเส้นทางใช้งานที่เหมาะสมไม่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้าว่าต้องเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่จะเป็นคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหา ทำให้ค่า w_i ที่เป็นค่าความจุใช้งานนั้นเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า และจะเห็นได้จากสมการ (3.13) ว่าค่าตัวแปร $N_{i,e}$ และค่าตัวแปร w_i เป็นสัดส่วนกัน ทำให้ปัญหานี้เป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear problem) ซึ่งไม่สามารถใช้การแก้ปัญหาด้วย ILP (Integer Linear Programming) ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกมาช่วยในการแก้ปัญหา โดยอาศัยหลักการวนซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่ละรอบของการวนซ้ำต้องผ่านขั้นตอนวิธีปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานของแต่ละการเชื่อมต่อคู่โหนด (Working Path Adjustment Algorithm : WPAA) เพื่อปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น เมื่อได้เส้นทางใช้งานใหม่และคำนวณค่าความจุใช้งานในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อแล้วก็นำมาเป็นอินพุตในรอบถัดไป ซึ่งจะทำให้ปัญหาย่อยที่ได้ในแต่ละรอบนั้นกลายเป็นปัญหาเชิงเส้น

เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางใช้งานที่แตกต่างกันนั้น มีผลโดยตรงต่อการวางความจุสำรอง จึงเกิดคำถามขึ้นว่าจะปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานของแต่ละการเชื่อมต่ออย่างไรให้เกิดผลดีต่อการวางความจุสำรองมากที่สุด ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานนั้น อันดับแรกจะต้องศึกษาถึงผลกระทบของการจัดสรรเส้นทางใช้งานที่มีต่อการวางความจุสำรองก่อน

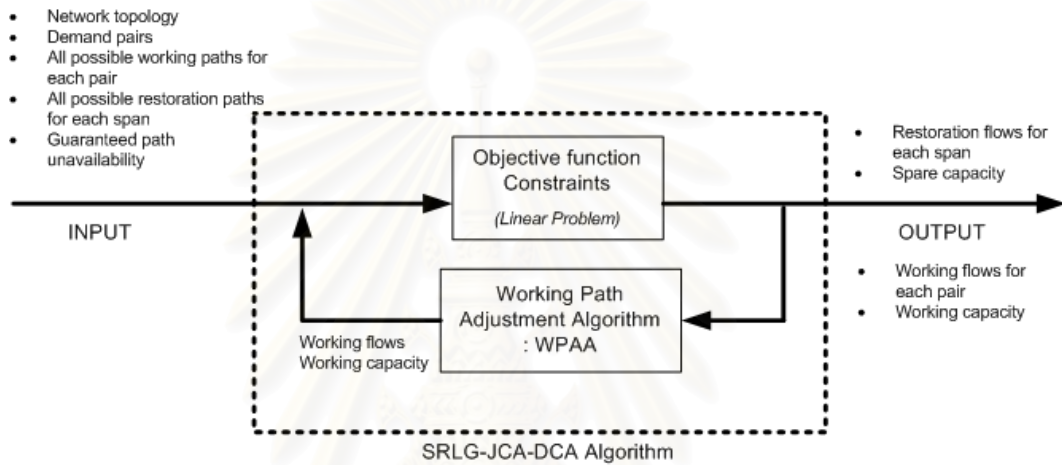
3.2.2 ผลกระทบของการจัดสรรเส้นทางใช้งานต่อการวางความจุสำรอง

การจัดสรรเส้นทางใช้งานที่ต่างกัน นอกเหนือจากจะทำให้แต่ละช่วงการเชื่อมต่อมีความจุใช้งานไม่เท่ากันแล้วยังส่งผลต่อการวางความจุสำรองเพื่อรองรับความเสียหายด้วย ในส่วนนี้ได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้โครงข่ายมีทอพอโลยีที่มีความสัมพันธ์ระหว่างชั้นกายภาพและชั้นเชิงตรรกะ ดังแสดงรูปที่ 3.2

กำหนดให้ทุกโหนดมีความต้องการส่งทราฟฟิกเท่ากัน และมีข้อบังคับว่าต้องมีอัตราการใช้บวระณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์สำหรับทุกท่อร้อยสายที่เกิดความเสียหาย โดยเปรียบเทียบการวางความจุด้วยวิธี SCA ที่มีการวางเส้นทางใช้งานที่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดไว้ล่วงหน้า กับวิธี JCA ที่มีการวางความจุใช้งานคู่กับความจุสำรอง โดยมีจุดประสงค์ให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุต่ำที่สุด ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 2 ผลที่ได้จากการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 3.3 และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการวางความจุแสดงในตาราง 3.1 ซึ่งในสดมภ์ (column) สุดท้ายของตารางเป็นค่าซ้ำซ้อนของโครงข่าย (network redundancy) ที่นิยามจากสัดส่วนของค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองกับค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งาน

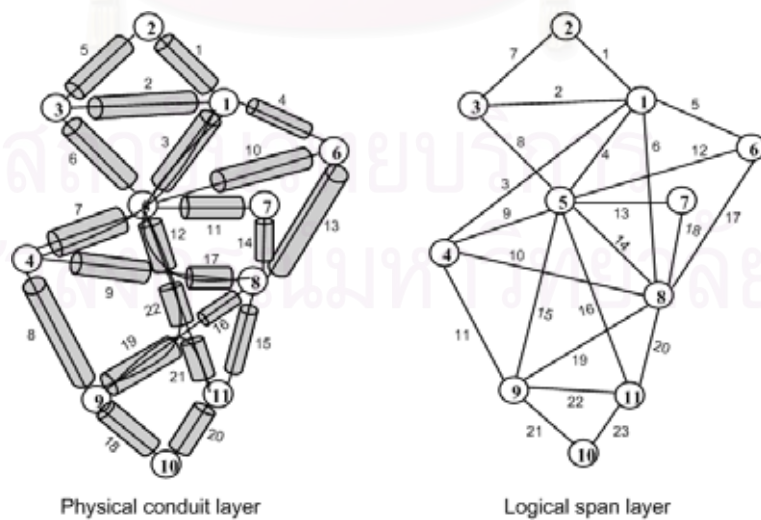


(a) Block diagram of SRLG-JCA-DCA Algorithm

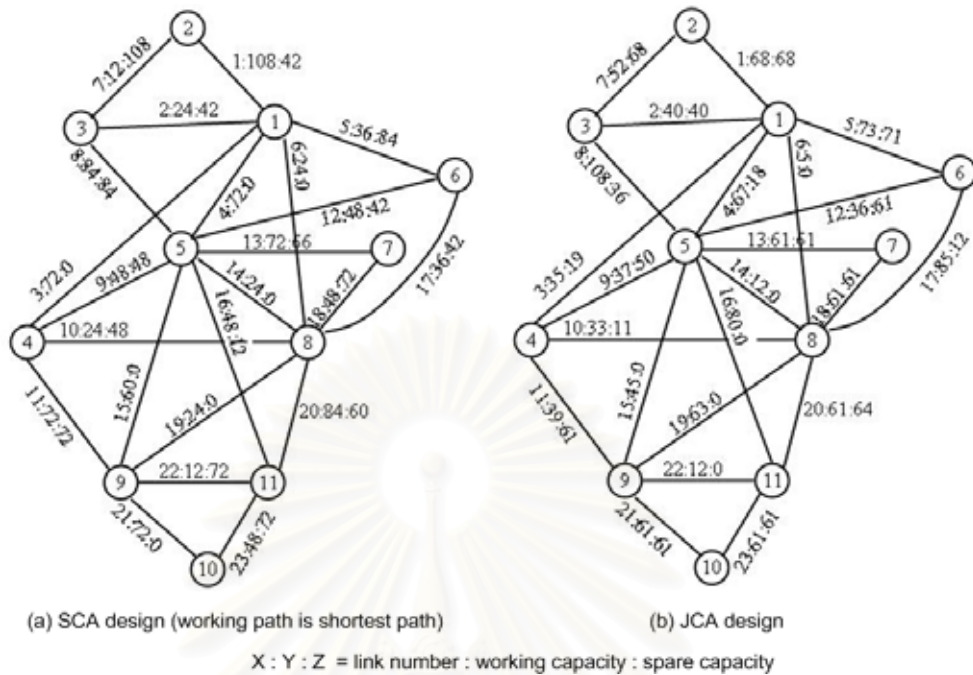


(b) Problem decomposition for SRLG-JCA-DCA Algorithm

รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการทำงานของวิธี SRLG-JCA-DCA



รูปที่ 3.2 โครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 การวางความจุที่ได้จากวิธี SCA เปรียบเทียบกับวิธี JCA

จากตาราง 3.1 จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายโดยรวมในการวางความจุของวิธี JCA น้อยกว่าวิธี SCA ถึงแม้ว่าค่าความจุใช้งานของวิธี JCA จะมากกว่าเนื่องจากเส้นทางใช้งานของการเชื่อมต่อบางจุดนั้นไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ก็มีผลทำให้โครงข่ายต้องการความจุสำรองโดยรวมน้อยลงถึง 19.61 % นั่นหมายความว่าความคุ้มค่าในการวางความจุสำรองที่วางลงในโครงข่ายในวิธี JCA นั้นมีมากกว่าวิธี SCA ซึ่งดัชนีที่ใช้ชี้วัดความคุ้มค่าของการใช้งานความจุสำรองนั้นจะวัดในเทอมของการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง (spare capacity utilization) ของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่าย

การใช้ประโยชน์ของความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ i (Ut_i) สามารถหาได้จากสมการ (3.16) [23]

$$Ut_i = \frac{\sum_{e \in FS'_i} (K_{i,e}/s_i)}{|FS'_i|} \tag{3.16}$$

ความหมายของสมการ (3.16) คือ ความจุสำรองที่วางลงในช่วงการเชื่อมต่อ i จะถูกใช้ร่วมกันสำหรับรูปแบบความเสียหายต่างๆ มากน้อยแค่ไหน โดยที่เซต FS'_i คือเซตของรูปแบบความเสียหายทั้งหมด (ซึ่งในที่นี้คือความเสียหายของท่อร้อยสาย) แต่ไม่รวมรูปแบบความเสียหายที่ทำให้ช่วงการเชื่อมต่อ i เกิดความเสียหาย เนื่องจากความจุในช่วงการเชื่อมต่อ i ไม่สามารถใช้งานได้ถ้ามันเกิดความเสียหาย และ $K_{i,e}$ คือ จำนวนความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ i ที่ถูกใช้โดยรูปแบบความเสียหาย e ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{i,e} = \sum_{j \in I} \mu_{j,e} \sum_{p \in P_{j,e}} f_{j,e}^p \cdot \delta_{j,i}^p \tag{3.17}$$

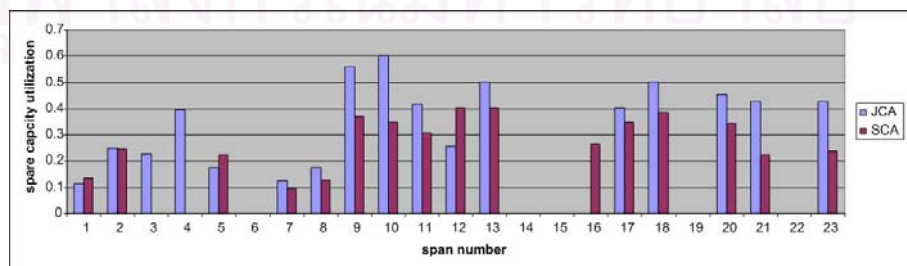
ตารางที่ 3.1 ค่าใช้จ่ายในการวางความจุของวิธี SCA เปรียบเทียบกับ JCA

design method	working capacity cost	spare capacity cost	total cost	network redundancy
SCA	1680	1152	2832	68.57%
JCA	1738	926	2664	53.28%
%difference	3.45%	-19.61%	-5.93%	

ตารางที่ 3.2 ค่า $K_{i,e}$ ของการออกแบบความจุสำรองด้วยวิธี SCA

$i \backslash e$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	-	24	36	0	12	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	24	-	48	36	12	48	48	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	84	0	84	-	0	84	32	0	0	48	0	24	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0
6	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
7	108	24	36	0	-	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	84	0	84	36	0	-	48	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	48	0	0	0	-	24	24	0	48	48	0	48	24	0	24	24	48	0	0	48
10	0	0	24	0	0	0	48	48	-	0	48	24	0	48	48	0	-	48	24	48	12	0
11	0	0	0	0	0	0	72	-	0	0	0	72	0	0	72	0	0	72	72	48	12	48
12	36	0	36	36	0	36	16	0	0	-	24	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	48	0	0	0	0	48	60	12	24	0	-	60	36	48	36	0	48	12	0	0	48	60
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	-	0	0	-
16	0	0	0	0	0	0	12	12	0	0	0	-	0	0	12	0	0	12	12	0	-	-
17	48	0	48	0	0	48	48	0	0	0	24	48	-	0	0	0	24	0	0	0	0	0
18	48	0	0	0	0	48	60	12	24	0	72	60	36	-	36	0	48	12	0	0	48	60
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	60	60	0	0	0	42	0	0	-	24	0	60	0	48	60	60
21	0	0	0	0	0	0	72	72	0	0	0	12	0	0	72	24	0	-	24	48	0	12
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0
23	0	0	0	0	0	0	72	72	0	0	0	12	0	0	72	24	0	72	24	-	0	12

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ - ในตาราง หมายถึง ช่วงการเชื่อมต่อ i เกิดความเสียหายจากความเสียหายของท่อร้อยสาย e



รูปที่ 3.4 ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อของวิธี SCA เปรียบเทียบกับวิธี JCA

รูปที่ 3.4 แสดงการใช้ประโยชน์ความจุสำรองในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อของวิธี SCA เทียบกับวิธี JCA ซึ่งปรากฏว่า ช่วงการเชื่อมต่อโดยส่วนใหญ่ของการวางแผนความจุด้วยวิธี JCA จะมีค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองสูงกว่าวิธี SCA ทั้งนี้เพราะวิธี JCA สามารถกระจายความจุใช้งานไปทั่วโครงข่าย จึงไม่มีช่วงการเชื่อมต่อใดช่วงหนึ่งที่ต้องรับภาระมากไปเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น ทำให้แต่ละความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันสามารถใช้ความจุสำรองร่วมกันได้มากกว่าวิธี SCA

สังเกตจากตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าในแต่ละช่องของตารางเป็นค่า $K_{i,e}$ ที่คำนวณได้จากการวางแผนความจุด้วยวิธี SCA โดยแต่ละแถวคือช่วงการเชื่อมต่อ i แต่ละสดมภ์คือท่อร้อยสาย e ซึ่งสัญลักษณ์ "-" ในตารางหมายถึง ช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่านท่อร้อยสาย e ดังนั้นเมื่อท่อร้อยสาย e เสียหายจึงไม่สามารถใช้ความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ i ได้ จะเห็นได้ว่าในวิธี SCA นั้นต้องวางแผนความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ถึง 108 ช่องสัญญาณ เพื่อรองรับความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 ได้ครบทั้งหมด แต่ความจุสำรองที่วางลงไปนี้ถูกใช้ในกรณีที่ช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 เกิดความเสียหายเพียงแค่ 24 ช่องสัญญาณเท่านั้น หมายความว่า การใช้ประโยชน์ความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 เป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

วิธีที่สามารถเพิ่มค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองได้ คือ ลดปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อนั้น หรือพยายามให้ความจุสำรองที่วางลงไปถูกใช้มากขึ้น ซึ่งการลดปริมาณความจุสำรองนั้นจะส่งผลต่อรูปแบบความเสียหายบางรูปแบบที่ต้องการใช้ปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อนั้นมากที่สุด เช่น การลดปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 จะส่งผลต่อความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 เพราะช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 ต้องการใช้ความจุสำรองทั้งหมดในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ในกรณีนี้จะเรียกความเสียหายของช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 ว่าเป็นตัวบังคับ (forcer) ของช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 หลักการของตัวบังคับ (forcer concept) ถูกคิดขึ้นโดย Grover และ Li [27] โดยให้คำนิยามของช่วงการเชื่อมต่อที่เป็นตัวบังคับ (forcer span) ว่าเป็นช่วงการเชื่อมต่อที่ส่งผลให้โครงข่ายจำเป็นต้องวางแผนความจุสำรองเพิ่มขึ้น ถ้าหากช่วงการเชื่อมต่อนั้นมีการเพิ่มความจุใช้งาน ดังนั้นถ้าหากต้องการลดปริมาณความจุสำรองของโครงข่าย ก็ต้องลดปริมาณความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อที่เป็นตัวบังคับ โดยการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานที่วิ่งอยู่ในช่วงการเชื่อมต่อนั้นไปยังเส้นทางใหม่ที่ประกอบด้วยช่วงการเชื่อมต่อที่ไม่เป็นตัวบังคับ เพราะการเพิ่มความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อที่ไม่เป็นตัวบังคับจะไม่ทำให้ความจุสำรองในโครงข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนวิธีปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน (WPAA) ที่เสนอนั้นจะใช้หลักการของตัวบังคับ เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง แต่เนื่องจากรูปแบบความเสียหายที่พิจารณาเป็นแบบ SRLG ซึ่งอาจจะมีหลายช่วงการเชื่อมต่อเสียหายพร้อมกัน ดังนั้นการพิจารณาตัวบังคับจึงต้องเป็นไปในลักษณะที่ว่ารูปแบบความเสียหายใด หรือความเสียหายของท่อร้อยสายใดที่เป็นตัวบังคับของการวางแผนความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่พิจารณา ซึ่งรูปแบบความเสียหายที่เป็นตัวบังคับอาจจะมีมากกว่าหนึ่งรูปแบบก็ได้ การหาเซตของรูปแบบความเสียหายของท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ i ก็คือเซตของท่อร้อยสายที่ต้องใช้ความจุสำรองทั้งหมดที่วางลงในช่วงการเชื่อมต่อ i ดังสมการ (3.18)

$$FC(i) = \{e \in E | K_{i,e} = S_i\} \quad (3.18)$$

โดยที่ $FC(i)$ คือ เซตของรูปแบบความเสียหายของท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ i

3.2.3 ขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วว่า การปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานเป็นการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น โดยอาศัยหลักการของตัวบ่งชี้มาพิจารณาว่าควรจะปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อใด ในส่วนของขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานมีพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ ดังนี้

im	ช่วงการเชื่อมต่อที่ต้องการปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง
(sn_i, dn_i)	คู่อินดันทง sn_i และโนดปลายทาง dn_i ของช่วงการเชื่อมต่อ i
$FC(i)$	เซตของท่อร้อยสายที่เป็นตัวบ่งชี้ของช่วงการเชื่อมต่อ i
s_i	ปริมาณความจุสำรองทั้งหมดที่วางลงในช่วงการเชื่อมต่อ i
\hat{s}_i	ปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ i ที่ถูกใช้งานมากเป็นอันดับ 2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\max_{e \in E \setminus FC(i)} \{k_{i,e}\}$
$S_{i,e}^r$	ปริมาณความจุสำรองคงเหลือ (residue spare capacity) ในช่วงการเชื่อมต่อ i สำหรับความเสียหายของท่อร้อยสาย e
$WP(e)$	เซตของเส้นทางใช้งานย่อยที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อใดๆในท่อร้อยสาย e
$AP(p)$	เซตของเส้นทางเลือก (alternate path) สำหรับเส้นทางย่อย p โดยที่เส้นทางเลือกจะต้องไม่ผ่านท่อร้อยสายใดๆมากกว่าหนึ่งครั้ง
$w'_{i,e}$	ปริมาณความจุใช้งานที่สามารถเพิ่มลงในท่อร้อยสาย e ที่เป็นทางผ่านของช่วงการเชื่อมต่อ i โดยไม่ทำให้มีการวางความจุสำรองเพิ่มขึ้น
w'_i	ปริมาณความจุใช้งานที่สามารถเพิ่มลงในช่วงการเชื่อมต่อ i โดยไม่ทำให้มีการวางความจุสำรองเพิ่มขึ้น
$wf_{p \rightarrow p'}$	ปริมาณความจุใช้งานของเส้นทางย่อย p ที่ย้ายไปยัง p' โดยไม่ทำให้มีการวางความจุสำรองเพิ่มขึ้น
w_p	ปริมาณความจุใช้งานในเส้นทางย่อย p
$w_{p \rightarrow p'}$	ปริมาณความจุใช้งานของเส้นทางย่อย p ที่ย้ายไปยัง p'
$\Delta wcost_{p \rightarrow p'}$	ความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุใช้งานในการย้ายเส้นทางย่อย p ไปยัง p'
$\Delta scost_{p \rightarrow p'}$	ความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุสำรองในการย้ายเส้นทางย่อย p ไปยัง p'
$\Delta cost_{p \rightarrow p'}$	ความแตกต่างของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการย้ายเส้นทางย่อย p ไปยัง p'
w_i	ปริมาณความจุใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i ก่อนการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน
w'_i	ปริมาณความจุใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อ i หลังการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน
$CS(sn_i, dn_i)$	เซตของเซตตัด (cutset) ของคู่อินด sn_i และ dn_i ที่เป็นไปได้ทั้งหมด

หลักการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานนั้น เป็นไปตามผังงานในรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- (บรรทัดที่ 1) เลือกช่วงการเชื่อมต่อ im ที่ต้องการลดปริมาณความจุสำรอง เพื่อปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง เช่น สมมติให้ im เป็นช่วงการเชื่อมต่อที่มีค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองต่ำที่สุด ตาม

Algorithm WPAA**Input:** $w_i \quad \forall i \in I$ **Output:** $w'_i \quad \forall i \in I$

```

1. Select improved span  $im$ 
2. Find set  $FC(im)$ 
3. for  $\forall e \in FC(im)$ 
4.     Find set  $WP(e)$ 
5.     for  $\forall p \in WP(e)$ 
6.         Find set  $AP(p)$ 
7.         for  $\forall p' \in AP(p)$ 
8.             Calculate  $w_{p \rightarrow p'}$ 
9.             Calculate  $\Delta wcost_{p \rightarrow p'}$ 
10.            Calculate  $\Delta scost_{p \rightarrow p'}$ 
11.             $\Delta cost_{p \rightarrow p'} = \Delta wcost_{p \rightarrow p'} + \Delta scost_{p \rightarrow p'}$ 
12.        end
13.    end
14.    Select best move  $p \rightarrow p'$  which has minimum  $\Delta cost_{p \rightarrow p'}$ 
15.    for  $\forall i \in I$ 
16.         $w_i = w_i + w_{p \rightarrow p'} (\eta_i^{p'} - \eta_i^p)$ 
17.        update  $w'_i = w_i$ 
18.    end
19. end

```

```

20. Function Calculate  $w_{p \rightarrow p'}$ 
21. if ( $|FC(im)| > 1$ )
22.     then set  $w_{p \rightarrow p'} = 1$ 
23.     else Calculate  $wf_{p \rightarrow p'}$ 
24.          $w_{p \rightarrow p'} = \min \{wf_{p \rightarrow p'}, (s_{im} - \hat{s}_{im}), w_p\}$ 
25.     return  $w_{p \rightarrow p'}$ 

```

```

26. Function Calculate  $\Delta wcost_{p \rightarrow p'}$ 
27.  $\Delta wcost_{p \rightarrow p'} = w_{p \rightarrow p'} \times \sum_{i \in I} C_i (\eta_i^{p'} - \eta_i^p)$ 
28. return  $\Delta wcost_{p \rightarrow p'}$ 

```

```

29. Function Calculate  $\Delta scost_{p \rightarrow p'}$ 
30.  $\Delta scost_{p \rightarrow p'} = w_{p \rightarrow p'}$ 
31. return  $\Delta scost_{p \rightarrow p'}$ 

```

```

32. Function Calculate  $wf_{p \rightarrow p'}$ 
33. (* find  $w'_i$ , for all  $i$  which path  $p$  pass through *)
34. for ( $\forall i \in I | \eta_i^p = 1$ )
35.     find  $CS(sn_i, dn_i)$ 
36.     for ( $\forall e \in E | \mu_{i,e} = 1$ )
37.          $w'_{i,e} = \min_{\forall CS' \in CS(sn_i, dn_i)} \{ \sum_{j \in CS'} S'_{j,e} \}$ 
38.     end
39.      $w'_i = \min_{(\forall e \in E | \mu_{i,e} = 1)} \{ w'_{i,e} \}$ 
40. end
41.  $wf_{p \rightarrow p'} = \min_{(\forall i \in I | \eta_i^p = 1)} \{ w'_i \}$ 
42. return  $wf_{p \rightarrow p'}$ 

```

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน WPAA

สมการ (3.19)

$$im = i | (Ut_i < Ut_j \quad \forall j \in I, j \neq i) \quad (3.19)$$

ยกตัวอย่างการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานหลังการออกแบบการวางความจุด้วยวิธี SCA จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า ช่วงการเชื่อมต่อที่มีค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองต่ำที่สุด คือช่วงการเชื่อมต่อที่ 7

- (บรรทัดที่ 2) หาเซต $FC(im)$ ซึ่งประกอบด้วยท่อร้อยสายทั้งหมดที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im ตามสมการ (3.18) เพื่อทำการลดปริมาณความจุใช้งานในท่อร้อยสายเหล่านี้ เช่น จากตารางที่ 3.2 ถ้า im คือช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 จะได้ว่าท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับได้แก่ ท่อร้อยสายที่ 1
- (บรรทัดที่ 3-4) สำหรับแต่ละท่อร้อยสาย e ที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im หาเซต $WP(e)$ ซึ่งเป็นเซตของเส้นทางใช้งานทั้งหมดที่ผ่านท่อร้อยสาย e เพื่อหาว่าในขั้นตอนถัดไปควรย้ายเส้นทางใช้งานใดออกจากท่อร้อยสาย e เพื่อลดความจุใช้งานในท่อร้อยสาย e เช่น สำหรับท่อร้อยสายที่ 1 ที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 มีเซตของเส้นทางใช้งานที่ผ่านท่อร้อยสายที่ 1 ดังนี้
 - เส้นทางที่ 1 จากโนด 1 ไปยังโนด 2 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1
 - เส้นทางที่ 2 จากโนด 2 ไปยังโนด 4 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 3
 - เส้นทางที่ 3 จากโนด 2 ไปยังโนด 5 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 4
 - เส้นทางที่ 4 จากโนด 2 ไปยังโนด 6 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 5
 - เส้นทางที่ 5 จากโนด 2 ไปยังโนด 7 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 4 13
 - เส้นทางที่ 6 จากโนด 2 ไปยังโนด 8 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 6
 - เส้นทางที่ 7 จากโนด 2 ไปยังโนด 9 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 3 11
 - เส้นทางที่ 8 จากโนด 2 ไปยังโนด 10 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 3 11 21
 - เส้นทางที่ 9 จากโนด 2 ไปยังโนด 11 ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 4 16
- (บรรทัดที่ 5-6) สำหรับแต่ละเส้นทาง p ในเซตของ $WP(e)$ ให้หาเซต $AP(p)$ ซึ่งเป็นเซตของเส้นทางเลือก (alternate path) ที่เป็นไปได้สำหรับเส้นทาง p โดยที่เส้นทางเลือกเหล่านี้มีข้อกำหนดว่า จะต้องไม่ผ่านท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im นั่นคือ

$$\eta_{im}^{p'} = 0 \quad \forall p' \in AP(p), \forall p \in WP(e), \forall e \in FC(im) \quad (3.20)$$

และอีกข้อกำหนดหนึ่งคือ ทุกเส้นทางเลือกจะต้องไม่ผ่านท่อร้อยสายใดมากกว่าหนึ่งครั้ง ยกตัวอย่างเช่น สำหรับ $p = 1$ ในเซต $WP(1)$ ซึ่งก็คือเส้นทางใช้งานจากโนด 1 ไปโนด 2 มีเส้นทางเลือกทั้งหมด 36 เส้นทางคือ

เส้นทางเลือกที่ : ช่วงการเชื่อมต่อที่ผ่าน	เส้นทางเลือกที่ : ช่วงการเชื่อมต่อที่ผ่าน
$p' = 1$: 2 7	$p' = 2$: 4 8 7
$p' = 3$: 5 12 8 7	$p' = 4$: 5 17 14 8 7
$p' = 5$: 6 18 13 8 7	$p' = 6$: 5 17 18 13 8 7
$p' = 7$: 6 17 12 8 7	$p' = 8$: 3 10 18 13 8 7
$p' = 9$: 5 17 10 9 8 7	$p' = 10$: 3 11 15 8 7
$p' = 11$: 3 10 17 12 8 7	$p' = 12$: 5 17 20 16 8 7
$p' = 13$: 3 10 20 16 8 7	$p' = 14$: 3 11 19 14 8 7
$p' = 15$: 6 19 11 9 8 7	$p' = 16$: 3 11 19 18 13 8 7
$p' = 17$: 5 17 19 11 9 8 7	$p' = 18$: 3 11 19 17 12 8 7
$p' = 19$: 3 11 21 23 16 8 7	$p' = 20$: 3 11 22 20 14 8 7
$p' = 21$: 6 20 22 11 9 8 7	$p' = 22$: 3 11 21 23 20 14 8 7
$p' = 23$: 3 11 22 20 18 13 8 7	$p' = 24$: 5 17 20 22 11 9 8 7
$p' = 25$: 5 17 20 23 21 15 8 7	$p' = 26$: 6 20 23 21 11 9 8 7
$p' = 27$: 3 11 21 23 20 18 13 8 7	$p' = 28$: 5 17 20 23 21 11 9 8 7
$p' = 29$: 3 11 19 20 16 8 7	$p' = 30$: 5 17 10 11 15 8 7
$p' = 31$: 3 10 20 23 21 15 8 7	$p' = 32$: 3 11 22 20 17 12 8 7
$p' = 33$: 5 17 19 21 23 16 8 7	$p' = 34$: 3 11 21 23 20 17 12 8 7
$p' = 35$: 3 10 19 21 23 16 8 7	$p' = 36$: 5 17 10 11 21 23 16 8 7

- (บรรทัดที่ 7-12) สำหรับแต่ละเส้นทางเลือกที่เป็นไปได้ p' ให้คำนวณ

– (บรรทัดที่ 8) หาปริมาณความจุของเส้นทางจากเดิม p ที่ย้ายไปยังเส้นทางเลือก p' ($w_{p \rightarrow p'}$)

การคำนวณความจุที่สามารถย้ายจากเส้นทาง p ไปยัง p' นั้นเป็นไปตามฟังก์ชัน $Calculate(w_{p \rightarrow p'})$ ในบรรทัดที่ 20-25 นั่นคือ ถ้าหากจำนวนท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im มีมากกว่าหนึ่งท่อร้อยสาย จะกำหนดให้ค่าความจุที่ย้ายจากเส้นทางเดิมไปยังเส้นทางใหม่เท่ากับหนึ่งช่องสัญญาณ เนื่องจากต้องย้ายเส้นทางในทุกท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับ เพื่อให้ปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ im ลดลง เช่น จากตารางที่ 3.2 ถ้าหากช่วงการเชื่อมต่อ im คือช่วงการเชื่อมต่อที่ 23 จำเป็นต้องย้ายเส้นทางในท่อร้อยสายที่ 7, 8, 14 และ 17 เพื่อลดความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 23 แต่ถ้าหากมีท่อร้อยสายเส้นใดเส้นหนึ่งที่ไม่มีเส้นทางใช้งานที่สามารถย้ายได้โดยไม่ต้องเพิ่มความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่ออื่น ก็จะทำให้การลดความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 23 นั้นส่งผลให้ต้องเพิ่มความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่ออื่นของโครงข่าย แต่ถ้าหากจำนวนท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im มี

เพียงหนึ่งท่อร้อยสาย เช่นในกรณีที่ im คือช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 และมีตัวบังคับคือ ท่อร้อยสายที่ 1 เพียงเส้นเดียว ค่าความจุใช้งานที่จะย้ายจากเส้นทาง p ไปยังเส้นทาง p' ใดๆ สามารถมีค่าเกินหนึ่งช่องสัญญาณได้ ขึ้นอยู่กับค่าต่ำสุดระหว่าง (1) $w_{f_{p \rightarrow p'}}$ ซึ่งก็คือปริมาณความจุที่สามารถย้ายจากเส้นทาง p ไปยังเส้นทาง p' โดยไม่ทำให้ช่วงการเชื่อมต่อใดในโครงข่ายต้องวางความจุสำรองเพิ่มขึ้น (2) $s_{im} - \hat{s}_{im}$ เป็นค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ im ทั้งหมด และปริมาณความจุสำรองสูงสุดที่ถูกใช้งานโดยท่อร้อยสายที่ไม่ได้เป็นตัวบังคับ นั่นคือปริมาณความจุสำรองที่สามารถลดลงได้มากที่สุดจากการย้ายเส้นทางใช้งานออกจากท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับ เช่น ในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ค่า $s_7 - \hat{s}_7 = 108 - 36$ เท่ากับ 72 เป็นค่าปริมาณความจุสำรองสูงสุดในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ที่สามารถลดลงได้จากการลดความจุใช้งานในท่อร้อยสายที่ 1 ซึ่งถ้าหากความจุใช้งานในท่อร้อยสายที่ 1 สามารถลดลงได้มากกว่านี้ ก็ไม่ทำให้ความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ลดลงได้อีก เนื่องจากท่อร้อยสายที่ 3 และ 6 จะกลายมาเป็นตัวบังคับแทน (3) w_p คือความจุใช้งานในเส้นทาง p เนื่องจากปริมาณความจุสูงสุดที่ย้ายได้ของเส้นทางใดๆ จะมีค่าไม่เกินความจุใช้งานของเส้นทางนั้น

ในการคำนวณค่า $w_{f_{p \rightarrow p'}}$ นั้นเป็นไปตามฟังก์ชัน $Calculate(w_{f_{p \rightarrow p'}})$ ในบรรทัดที่ 32-42 ซึ่งเป็นการหาค่าความจุใช้งานที่สามารถเพิ่มลงในเส้นทางเลือก p' โดยที่ไม่ทำให้ช่วงการเชื่อมต่อใดต้องวางความจุสำรองเพิ่ม การหาค่า $w_{f_{p \rightarrow p'}}$ นั้นต้องทราบค่า w'_i สำหรับทุกช่วงการเชื่อมต่อ i ของเส้นทาง p' ก่อนว่าแต่ละช่วงการเชื่อมต่อ i นั้นสามารถเพิ่มความจุใช้งานได้เท่าใด โดยไม่มีผลต่อปริมาณความจุสำรองของโครงข่าย ซึ่งค่า w'_i ที่ต่ำที่สุดของทุกช่วงการเชื่อมต่อ i ของเส้นทางเลือก p' ก็คือค่าความจุใช้งาน $w_{f_{p \rightarrow p'}}$ ที่สามารถเพิ่มลงในเส้นทางเลือก p' นั้นเอง ตามสมการในบรรทัดที่ 41 ดังนั้นหากในเส้นทางเลือก p' มีช่วงการเชื่อมต่อใดที่อยู่ในท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่ออื่น ก็ไม่มีทางที่จะเพิ่มความจุใช้งานในเส้นทาง p' นั้นโดยไม่มีกรเพิ่มความจุสำรองของโครงข่าย

เช่นเดียวกันในการหาค่า w'_i ของช่วงการเชื่อมต่อ i นั้น ต้องทราบค่า $w'_{i,e}$ สำหรับแต่ละท่อร้อยสาย e ที่ช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่านว่าสามารถรองรับความจุใช้งานเพิ่มได้เท่าใด โดยไม่ต้องเพิ่มความจุสำรองในโครงข่าย ตามสมการในบรรทัดที่ 39 จะเห็นได้ว่าค่า w'_i คือค่าต่ำสุดของ $w'_{i,e}$ ของทุกท่อร้อยสาย e ที่ช่วงการเชื่อมต่อ i นั้นผ่าน

ขั้นตอนการหาค่า w_i นั้นอาศัยทฤษฎี Min-cut Max-flow เริ่มต้นโดยการหาเซต $CS(sn_i, dn_i)$ ซึ่งประกอบด้วยเซตตัดทั้งหมดของโนดต้นทาง sn_i และโนดปลายทาง dn_i ของช่วงการเชื่อมต่อ i ซึ่งนิยามของเซตตัดของคูโนด (sn_i, dn_i) คือเซตที่ประกอบด้วยช่วงการเชื่อมต่อที่เมื่อนำออกจากโครงข่ายแล้วจะทำให้โครงข่ายแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยที่โนด sn_i และโนด dn_i ขาดการเชื่อมต่อกัน ผลรวมของความจุในช่วงการเชื่อมต่อทั้งหมดในเซตตัดใดๆก็คือ ความจุของเซตตัดนั้น ความจุของเซตตัดที่มีค่าน้อยที่สุดจะเท่ากับค่าทราฟฟิกสูงสุดที่สามารถส่งได้ระหว่างคูโนด sn_i และ dn_i เนื่องจากสิ่งที่ต้องการหาคือปริมาณความจุใช้งานที่สามารถวางเพิ่มในท่อร้อยสาย e ใดๆในช่วงการเชื่อมต่อ i ผ่าน เพื่อรองรับทราฟฟิกที่เพิ่มเข้ามาจากการย้ายเส้นทางใช้งานใดๆมายังช่วงการเชื่อมต่อ i โดยไม่มีกรวางความจุสำรองเพิ่มในโครงข่าย ดังนั้น

ความจุที่นำมาคิดของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อ j ในเซตตัดจึงเป็นความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อ j จากการบูรณะความเสียหายของท่อร้อยสาย e ($S_{j,e}^r$) ซึ่งหาได้จากสมการ (3.21)

$$S_{j,e}^r = \begin{cases} \tilde{s}_j - K_{j,e}, & \text{ถ้า } \mu_{j,e} = 0 \\ 0, & \text{ถ้า } \mu_{j,e} = 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

สมการในบรรทัดที่ 37 คือหลักการของ Min-cut Max-flow นั่นคือค่า $w'_{i,e}$ หรือค่าความจุใช้งานสูงสุดที่เพิ่มได้ในท่อร้อยสาย e จะเท่ากับผลรวมของความจุคงเหลือของช่วงการเชื่อมต่อของเซตตัดที่มีความจุคงเหลือต่ำที่สุด

ยกตัวอย่างกรณี $im = 7$ มีตัวบังคับเป็นท่อร้อยสายที่ 1 การคำนวณปริมาณความจุใช้งานที่สามารถย้ายจากเส้นทางใช้งาน $p = 1$ ของเซต $WP(e = 1)$ ซึ่งผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 ไปยังเส้นทางเลือก $p' = 1$ ของเซต $AP(p = 1)$ ซึ่งผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 และ 7 หรือนิยามโดย $w_{p=1 \rightarrow p'=1}$ มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่า $w_{p=1 \rightarrow p'=1}$

เนื่องจากเส้นทางใหม่ p' ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 และ 7

(a) คำนวณหา w'_2

- i. คูโหนดที่เชื่อมต่อกับช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 คือโหนด 1 และโหนด 3, คำนวณหาเซต $CS(1, 3)$
- ii. เนื่องจากช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 ผ่านท่อร้อยสายที่ 2 เพียงเส้นเดียว ดังนั้น $w'_2 = w'_{2,2}$ คำนวณหา $w'_{2,2}$ ซึ่งเซตตัดต่ำสุดของคูโหนด (1,3) ประกอบด้วยช่วงการเชื่อมต่อที่ 1, 2 และ 8

A. ปริมาณความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 สำหรับท่อร้อยสายที่ 2

$$S_{1,2}^r = 36 - 24 = 12$$

B. ปริมาณความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 สำหรับท่อร้อยสายที่ 2

$$S_{2,2}^r = 0$$

C. ปริมาณความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อที่ 8 สำหรับท่อร้อยสายที่ 2

$$S_{8,2}^r = 84 - 0 = 84$$

$$\text{ดังนั้นค่า } w'_2 = w'_{2,2} = S_{1,2}^r + S_{2,2}^r + S_{8,2}^r = 12 + 0 + 84 = 96$$

(b) คำนวณหา w'_7

- i. คูโหนดที่เชื่อมต่อกับช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 คือโหนด 2 และโหนด 3, คำนวณหาเซต $CS(2, 3)$
- ii. เนื่องจากช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 ผ่านท่อร้อยสายที่ 5 เพียงเส้นเดียว ดังนั้น $w'_7 = w'_{7,5}$ คำนวณหา $w'_{7,5}$ ซึ่งเซตตัดต่ำสุดของคูโหนด (2,3) ประกอบด้วยช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 และ 7

A. ปริมาณความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 สำหรับท่อร้อยสายที่ 5

$$S_{1,5}^r = 36 - 12 = 24$$

B. ปริมาณความจุสำรองคงเหลือในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 สำหรับท่อร้อยสายที่ 5

$$S_{7,5}^r = 0$$

$$\text{ดังนั้นค่า } w_7' = w_{7,5}' = S_{1,5}^r + S_{7,5}^r = 24 + 0 = 24$$

$$\text{ดังนั้นค่า } wf_{p=1 \rightarrow p'=1} = \min(w_2', w_7') = \min(96, 24) = 24$$

2. คำนวณหาค่าความจุสำรองที่สามารถลดลงได้มากที่สุดในช่วงการเชื่อมต่อที่ 7 จากการลดความจุใช้งานในท่อร้อยสายที่ 1 นั่นคือ $s_7 - \hat{s}_7 = 108 - 36 = 72$

3. เนื่องจากปริมาณกราฟฟิกรูปร่างในเส้นทางใช้งาน p (w_p) มีค่าเท่ากับ 12 ดังนั้นจากสมการในบรรทัดที่ 41 จะได้ว่าค่า $w_{p=1 \rightarrow p'=1} = \min(wf_{p=1 \rightarrow p'=1}, s_7 - \hat{s}_7, w_{p=1}) = \min(24, 72, 12) = 12$ นั่นคือกราฟฟิกทั้งหมดในเส้นทางใช้งาน $p = 1$ สามารถย้ายไปเส้นทางเลือก p' ได้ทั้งหมด เพื่อลดปริมาณความจุใช้งานในช่วงการเชื่อมต่อที่ 1

– (บรรทัดที่ 9) หาความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุใช้งานจากการย้ายกราฟฟิกในเส้นทาง p ไปยัง p' ($\Delta wcost_{p \rightarrow p'}$)

การคำนวณค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มความจุใช้งานเนื่องจากการย้ายกราฟฟิกจากเส้นทาง p ไปยัง p' นั้นเป็นไปตามฟังก์ชัน $Calculate(\Delta wcost_{p \rightarrow p'})$ ในบรรทัดที่ 26-28 นั่นคือ ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับปริมาณกราฟฟิกที่ย้ายไป คูณกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการย้ายหนึ่งหน่วยความจุของเส้นทาง p ไปยัง p' เช่น การย้ายกราฟฟิก 12 หน่วยความจุจากเส้นทาง p ที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 1 ไปยัง p' ที่ผ่านช่วงการเชื่อมต่อที่ 2 และ 7 มีค่าใช้จ่ายของความจุใช้งานเพิ่มขึ้นเท่ากับ $12 \times (C_2 + C_7 - C_1)$

– (บรรทัดที่ 10) หาความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุสำรองจากการย้ายกราฟฟิกในเส้นทาง p ไปยัง p' ($\Delta scost_{p \rightarrow p'}$)

ฟังก์ชัน $Calculate(\Delta scost_{p \rightarrow p'})$ ในบรรทัดที่ 29-31 นั้นใช้คำนวณค่า ($\Delta scost_{p \rightarrow p'}$) นั่นคือความจุสำรองที่ลดลงในช่วงการเชื่อมต่อ im มีค่าเท่ากับปริมาณความจุที่ย้ายออกจากเส้นทาง p ที่ผ่านท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im

– (บรรทัดที่ 11) หาความแตกต่างของค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากการย้ายกราฟฟิกในเส้นทาง p ไปยัง p' ($\Delta cost_{p \rightarrow p'}$) ซึ่งเท่ากับความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุใช้งานรวมกับความแตกต่างของค่าใช้จ่ายของความจุสำรอง

- (บรรทัดที่ 14) สำหรับแต่ละท่อร้อยสาย e ที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im ให้เลือกการย้ายจากเส้นทาง p ไปยัง p' เพียงคู่เดียวที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุของโครงข่ายลดลงมากที่สุด หรือมีค่าความแตกต่างของค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
- (บรรทัดที่ 15-17) หลังจากทำการย้ายทราฟฟิกแล้ว ให้คำนวณค่าความจุใช้งานในแต่ละช่วงการเชื่อมต่อใหม่ ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนวิธี WPAA แล้วจะทราบค่า w'_i สำหรับทุกช่วงการเชื่อมต่อ i ซึ่งจะนำค่า w'_i ชุดใหม่นี้ไปเป็นอินพุตในการปรับปรุงคำตอบในรอบถัดไป

3.3 ขั้นตอนวิธีวิธิตกในการแก้ไขปัญหาการวางความจุวิธี SRLG-JCA-DCA

3.3.1 หลักการค้นหาแบบตาบู่

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีวิธิตกที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาการวางความจุที่นำเสนอ โดยใช้หลักการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search: TS) ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Glover [25], [26] กระบวนการค้นหาแบบตาบู่ได้พัฒนามาจากการค้นหาแบบสืบทอด (descent search: DS) ที่ใช้กลวิธีวนซ้ำ การค้นหาแบบ DS มีหลักการคือ ในการวนซ้ำแต่ละรอบจะต้องหาเซตข้างเคียง (neighborhood set) ของผลเฉลยปัจจุบัน (current solution) เพื่อเลือกผลเฉลยถัดไปซึ่งเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดจากเซตข้างเคียงที่ได้ โดยมีการตรวจสอบว่าผลเฉลยถัดไปนั้นดีกว่าผลเฉลยเดิมหรือไม่ ถ้าดีกว่าก็ยอมรับการย้าย (move) ผลเฉลยนั้น และเริ่มทำซ้ำในรอบถัดไป การทำซ้ำจะหยุดเมื่อไม่มีการปรับปรุงผลเฉลย ซึ่งจะทำให้ผลเฉลยที่ได้นั้นเป็นเพียงค่าเหมาะที่สุดเฉพาะที่

กำหนดให้ผลเฉลย i เป็นผลเฉลยปัจจุบันของการวนซ้ำรอบที่ k และเซตข้างเคียงของผลเฉลย i ในรอบที่ k คือเซต $N(i, k)$ ในการสร้างชุดของผลเฉลยข้างเคียงที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเซต $N(i, k)$ นั้นอาจจะใช้เวลานานและมีความซับซ้อนมาก จึงได้มีการใช้วิธีกำหนดรายการให้เลือก (candidate list strategies) เพื่อลดเซตข้างเคียงให้แคบลงเป็นเซต V^* โดยที่ $V^* \subset N(i, k)$ และเลือกผลเฉลยถัดไปที่ให้ค่าจุดประสงค์ดีที่สุดในเซต V^* และยอมรับการย้ายนั้น ไม่ว่าจะการย้ายนั้นจะทำให้ผลเฉลยดีขึ้นหรือด้อยลงกว่าผลเฉลยปัจจุบันก็ตาม ซึ่งการยอมรับการย้ายที่ให้ผลเฉลยด้อยลงนั้นทำให้การค้นหาสามารถขยายออกไปได้กว้างขึ้น และเป็นการป้องกันไม่ให้ผลเฉลยที่ได้ตกลงสู่ค่าเหมาะที่สุดเฉพาะที่

นอกจากนี้ การค้นหาแบบตาบู่ก็ยังได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหา โดยระหว่างกระบวนการค้นหามีการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับผลเฉลยที่ได้ผ่านการค้นหาแล้วไว้ในตารางที่เรียกว่า tabu list และจะไม่อนุญาตการย้ายที่ทำให้ผลเฉลยใหม่ที่ได้ซ้ำกับผลเฉลยเดิมในรอบก่อนๆ การย้ายที่ถูกห้ามนี้จะเรียกว่าเป็นการย้ายที่อยู่ในสถานะตาบู่ (tabu move)

ตาราง tabu list จะมีการกำหนดความยาวไว้ และจะถูกปรับให้เป็นปัจจุบัน (update) ทุกรอบการทำซ้ำแบบเข้าก่อนออกก่อน (First In First Out : FIFO) โดยใส่ข้อมูลของผลเฉลยที่เพิ่งได้ในรอบล่าสุดลงในตาราง และลบข้อมูลที่เก่าที่สุดออกจากตาราง ดังนั้นการย้ายที่เป็นตาบู่จะถูกห้ามเพียงชั่วคราวไม่ก่อบการซ้ำซ้ำ ขึ้นอยู่กับความยาวของตาราง tabu list จึงเห็นได้ว่าการค้นหาแบบตาบู่เป็นวิธีการค้นหาเซตข้างเคียงแบบพลวัต (dynamic

neighborhood search techniques) นั่นคือเซต V^* ที่ได้จะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละรอบการทำซ้ำ ขึ้นอยู่กับการกำหนดข้อห้ามในการย้ายที่เป็นตามของกระบวนการค้นหาในอดีตที่ผ่านมา

อย่างไรก็ตามข้อห้ามของการย้ายที่อยู่ในสถานะตามนั้น สามารถถูกผ่อนปรนได้ ถ้าหากการย้ายนั้นน่าสนใจ (attractive) นั่นคือถ้าการย้ายนั้นเป็นไปตาม aspiration criteria ว่าการย้ายนั้นให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดในทุกกรอบที่ผ่านมา ก็อนุญาตให้ทำการย้ายนั้นได้ถึงแม้จะเป็นการย้ายที่อยู่ในสถานะตาม หลักการของตามสรุปได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 หาผลเฉลยตั้งต้น i , กำหนดให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ได้รับ $i^* = i$ และกำหนดให้ $k = 0$
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดให้ $k = k + 1$ และหาเซต V^*
- ขั้นตอนที่ 3
 - หาค่าจุดประสงค์ $f(j)$ สำหรับทุก j ที่เป็นสมาชิกของเซต V^*
 - ระบุสถานะของการย้ายจากผลเฉลย i ไปยังผลเฉลย j ว่าเป็นตามหรือไม่ สำหรับทุก j ที่เป็นสมาชิกของเซต V^*
 - หาเซต T ซึ่งประกอบด้วยผลเฉลย $j \in V^*$ ที่เกิดจากการย้ายที่อยู่ในสถานะตาม
 - หาเซต A ซึ่งประกอบด้วยผลเฉลย $j \in V^*$ ที่เป็นไปตาม aspiration criteria
- ขั้นตอนที่ 4 เลือก j ในเซต $(V^* - T) \cup A$ ที่ให้ค่าจุดประสงค์ $f(j)$ ดีที่สุด และกำหนดให้ $i = j$
- ขั้นตอนที่ 5 กำหนด aspiration level ใหม่ ถ้า $f(i) \leq f(i^*)$ กำหนดให้ $i^* = i$
- ขั้นตอนที่ 6 ปรับตารางตามให้เป็นปัจจุบัน
- ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด (stopping criteria) ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขให้ไปเริ่มที่ขั้นตอนที่ 2 ใหม่

เงื่อนไขการหยุดในขั้นตอนที่ 7 นั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดว่าจะให้หยุดการวนซ้ำเมื่อใด เช่น

- หยุดการทำซ้ำเมื่อ $N(i, k + 1) = \emptyset$
- หยุดการทำซ้ำเมื่อ $k \geq \text{max_iter}$ โดยที่ max_iter คือจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุดที่กำหนด
- หยุดการทำซ้ำเมื่อจำนวนรอบการวนซ้ำตั้งแต่การปรับปรุงค่า i^* ครั้งสุดท้าย มีค่าเกินค่าที่กำหนด
- หยุดการทำซ้ำเมื่อผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

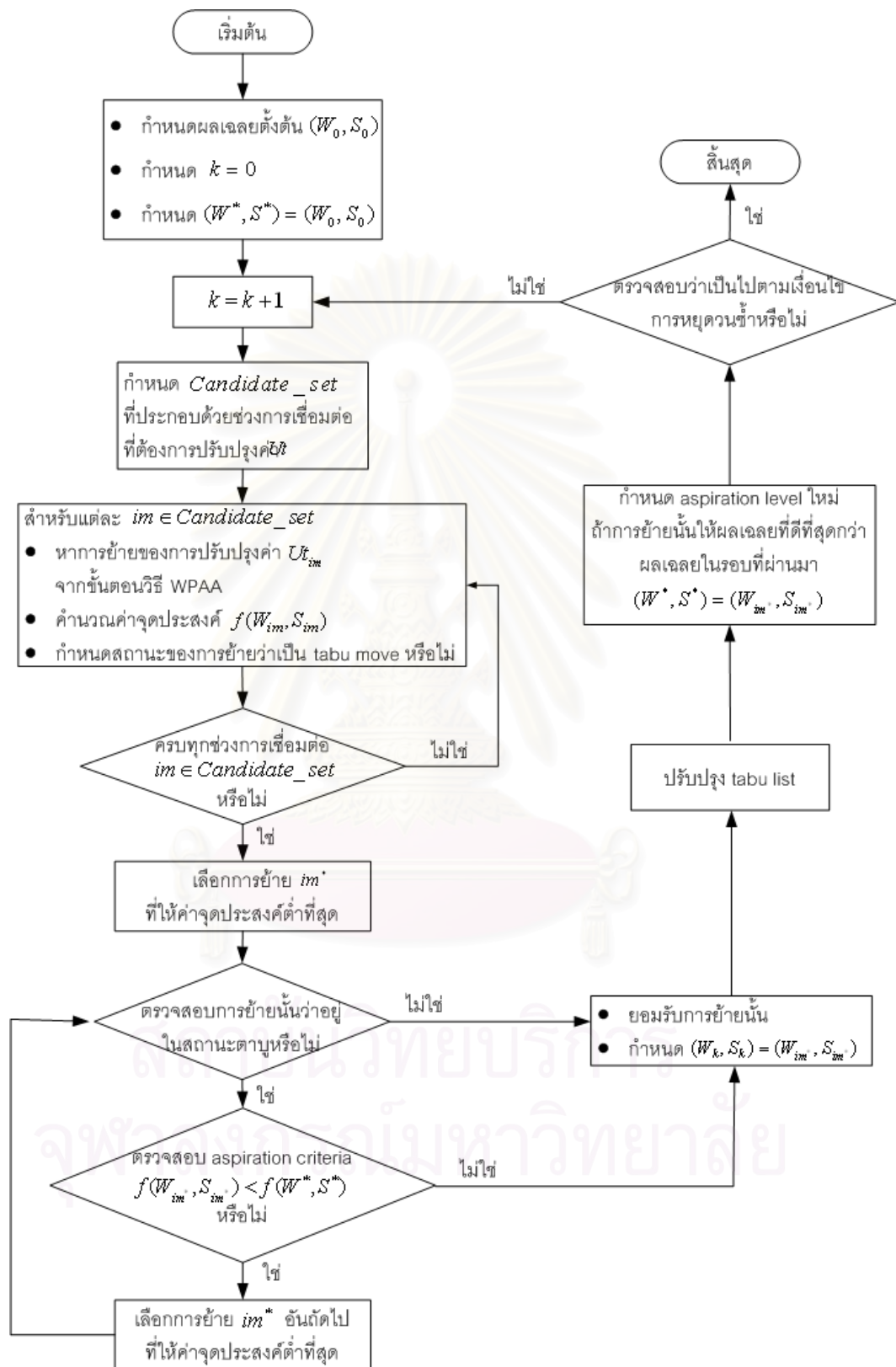
3.3.2 หลักการค้นหาแบบตาบอดสำหรับการออกแบบความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงการนำหลักการตามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA พารามิเตอร์ที่ใช้ในส่วนนี้ ได้แก่

W	$= \{w_1, w_2, \dots, w_{ I }\}$ เซตของจำนวนความจุใช้งานของช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่าย
S	$= \{s_1, s_2, \dots, s_{ I }\}$ เซตของจำนวนความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อในโครงข่าย
k	รอบที่ของการวนซ้ำ
l	tabu tenure หรือความยาวของตาราง tabu list
$f(W, S)$	ค่าจุดประสงค์ของผลเฉลย (W, S)
$Candidate_set$	เซตของช่วงการเชื่อมต่อที่ต้องการปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง
(W_k, S_k)	ผลเฉลยที่ได้จากการวนซ้ำที่ k
(W^*, S^*)	ผลเฉลยที่ดีที่สุดตั้งแต่เริ่มต้นรอบแรกของการวนซ้ำ
(W_{im}, S_{im})	ผลเฉลยที่ได้จากการปรับปรุงค่า U_{im}
(W_{im^*}, S_{im^*})	ผลเฉลยที่ได้จากการปรับปรุงค่า U_{im^*} โดยที่ $f(W_{im^*}, S_{im^*}) \leq f(W_{im}, S_{im}) \quad \forall im \in Candidate_set, im^* \neq im$

จากผังงานในรูปที่ 3.6 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1**
 - กำหนดผลเฉลยตั้งต้น (W_0, S_0) โดยให้ผลเฉลยตั้งต้นเป็นผลเฉลยจากการวางความจุสำรองด้วยวิธี SCA ที่ให้เส้นทางใช้งานระหว่างทุกคูโหนดเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด
 - กำหนดรอบของการวนซ้ำ $k = 0$
 - กำหนดให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดตั้งแต่เริ่มต้นรอบแรกของการวนซ้ำเป็นผลเฉลยตั้งต้น
- **ขั้นตอนที่ 2** เพิ่มรอบของการวนซ้ำไปหนึ่งรอบ
- **ขั้นตอนที่ 3** กำหนดขนาดของ $Candidate_set$ เท่ากับ n ซึ่งเท่ากับจำนวนช่วงการเชื่อมต่อที่ต้องการปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง และหาสมาชิกใน $Candidate_set$ ซึ่งในที่นี่จะเป็นช่วงการเชื่อมต่อ n ช่วงที่มีค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองต่ำสุด
- **ขั้นตอนที่ 4** สำหรับทุกช่วงการเชื่อมต่อ im ที่เป็นสมาชิกใน $Candidate_set$
 - หากการย้ายของการปรับปรุงช่วงการเชื่อมต่อ im โดยผ่านขั้นตอนวิธี WPAA ในรูปที่ 3.5 และนำเซตของเส้นทางใช้งานและค่าความจุใช้งานใหม่ที่ได้จากขั้นตอนวิธี WPAA มาเป็นอินพุตสำหรับ



รูปที่ 3.6 การแก้ไขปัญหการวางแผนความจุวิธี SRLG-JCA-DCA โดยใช้การค้นหาแบบตาม

คำนวณหาค่าความจุสำรองโดยใช้ ILP ที่เสนอในสมการ (3.8)-(3.15) ซึ่งจะได้ผลเฉลยเป็นเซต (W_{im}, S_{im})

- คำนวณหาค่าจุดประสงค์ของผลเฉลย (W_{im}, S_{im}) ซึ่งเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากการวางความจุใช้งานและความจุสำรอง
- กำหนดสถานะของการย้ายว่าเป็น tabu move หรือไม่ เนื่องจากว่าการย้ายเพื่อปรับปรุงค่า Ut_{im} นั้นเป็นการลดความจุใช้งานในท่อร้อยสาย e ที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im โดยการย้ายทราฟฟิกในเส้นทางใช้งาน p ที่อยู่ในท่อร้อยสาย e ไปยังเส้นทาง p' ที่เป็นเส้นทางเลือกที่ไม่ผ่านท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับ ดังนั้นการย้ายหนึ่งครั้งจะมีส่งผลกระทบต่อโครงข่าย 2 รูปแบบ คือ
 - * ส่งผลให้ความจุใช้งานรวมในท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับมีค่าลดลง
 - * ส่งผลให้ความจุใช้งานในท่อร้อยสายที่เส้นทาง p' มีค่าเพิ่มขึ้น

การเก็บข้อมูลของการย้ายลงในตาราง tabu list จึงมี 2 แบบ คือ ในตาราง tabu:CIWC (Conduit is not allowed to Increase Working Capacity) ใช้บันทึกท่อร้อยสายที่เป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im ที่มีจำนวนความจุใช้งานลดลงจากการย้ายเส้นทางในการวนซ้ำรอบปัจจุบัน และไม่อนุญาตให้มีการเพิ่มความจุใช้งานในท่อร้อยสายดังกล่าวในรอบถัดไป เพื่อป้องกันไม่ให้ผลเฉลยที่ได้ซ้ำเดิม ดังนั้นการย้ายที่ทำให้ต้องเพิ่มความจุใช้งานในท่อร้อยสาย e ที่ถูกบันทึกในตาราง tabu:CIWC เช่น การย้ายทราฟฟิกไปยังเส้นทาง p' โดยที่เส้นทาง p' ใช้ช่วงการเชื่อมต่อใดๆที่ผ่านท่อร้อยสาย e จะถูกกำหนดสถานะว่าการย้ายนั้นเป็น tabu move และการย้ายจะถูกห้ามไปอีก l รอบการวนซ้ำจนกว่าจะหมดสถานะตาม ค่า l ที่กำหนดนี้เรียกว่า tabu tenure

เนื่องจากในขั้นตอนวิธี WPAA การปรับปรุงค่า Ut_{im} ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา นั้นสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนทราฟฟิกจากเส้นทางใช้งาน $p \rightarrow p'$ ได้หลายคู่ และจะเลือกการปรับเปลี่ยน $p \rightarrow p'$ ที่ดีที่สุด ตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในบรรทัดที่ 14 ในรูปที่ 3.5 แต่เมื่อนำหลักการห้ามการย้ายที่เป็น tabu move เข้ามาพิจารณาด้วย ทำให้การย้ายของการปรับปรุงค่า Ut_{im} นั้นจะเลือกพิจารณาการปรับเปลี่ยนเส้นทางที่ไม่ส่งผลให้การย้ายนั้นเป็น tabu move เช่น การปรับเปลี่ยนเส้นทางไปยัง p' ที่ไม่ผ่านท่อร้อยสายที่อยู่ในตาราง tabu:CIWC นั่นคือเลือกการปรับเปลี่ยน $p \rightarrow p'$ ที่ดีที่สุดที่ไม่ทำให้การย้ายนั้นเป็น tabu move แต่ถ้าหากทุกการปรับเปลี่ยน $p \rightarrow p'$ ที่เป็นไปได้ทั้งหมดทำให้การย้ายของการปรับปรุง Ut_{im} นั้นเป็น tabu move ก็จะต้องเลือกการปรับเปลี่ยน $p \rightarrow p'$ ที่ดีที่สุดและกำหนดให้การย้ายนั้นอยู่ในสถานะ tabu move

ส่วนตาราง tabu:CDWC (Conduit is not allowed to Decrease Working Capacity) นั้นเป็นตาราง tabu list ที่ใช้ในการบันทึกท่อร้อยสายที่มีการเพิ่มความจุใช้งานจากการปรับเปลี่ยนเส้นทาง $p \rightarrow p'$ ในการวนซ้ำรอบปัจจุบัน และหากการเพิ่มความจุใช้งานในท่อร้อยสายส่งผลให้ท่อร้อยสายนั้นเป็นตัวบังคับของช่วงการเชื่อมต่อ im ที่ต้องการปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุ

สำรองในรอบการวนซ้ำถัดไป ก็จะไม่อนุญาตให้มีการลดความจุใช้งานในท่อร้อยสายนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ผลเฉลยซ้ำเดิมอีก โดยการกำหนดให้การย้ายนั้นอยู่ในสถานะ tabu move จนกว่าการย้ายจะหมดสถานะตาม

- **ขั้นตอนที่ 5** เลือกการย้ายของการปรับปรุงช่วงการเชื่อมต่อ $im^* \in Candidate_set$ ที่ให้ค่าจุดประสงค์ต่ำที่สุด
- **ขั้นตอนที่ 6** ตรวจสอบว่าการย้ายของการปรับปรุงช่วงการเชื่อมต่อ im^* นั้นอยู่ในสถานะ tabu move หรือไม่ ถ้าเป็น tabu move ให้ไปขั้นตอนที่ 7 แต่ถ้าไม่ได้เป็น tabu move ให้ไปขั้นตอนที่ 9
- **ขั้นตอนที่ 7** ตรวจสอบว่าการย้ายที่เป็น tabu move นั้นเป็นไปตาม aspiration criterion หรือไม่ นั่นคือการย้ายนั้นให้ค่าจุดประสงค์ที่ดีที่สุดตั้งแต่การวนซ้ำรอบแรกหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ ให้ไปขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้าเป็นไปตาม aspiration criterion ให้ไปขั้นตอนที่ 9
- **ขั้นตอนที่ 8** เลือกการย้ายของการปรับปรุงช่วงการเชื่อมต่อ $im^* \in Candidate_set$ ที่ให้ค่าจุดประสงค์ต่ำที่สุดลำดับถัดไป และกลับไปยังขั้นตอนที่ 6
- **ขั้นตอนที่ 9** ยอมรับการย้ายนั้น และกำหนดให้ผลเฉลยในรอบการวนซ้ำปัจจุบัน เป็นผลเฉลยที่ได้จากการย้ายของการปรับปรุงช่วงการเชื่อมต่อ im^*
- **ขั้นตอนที่ 10** ปรับตาราง tabu:CIWC และตาราง tabu:CDWC ให้เป็นปัจจุบัน
- **ขั้นตอนที่ 11** ปรับค่า aspiration level ใหม่ โดยการกำหนดให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ได้ตั้งแต่การวนซ้ำรอบแรก (W^*, S^*) เป็นผลเฉลยปัจจุบัน ถ้าหากผลเฉลยที่ได้ในรอบปัจจุบันให้ค่าจุดประสงค์ที่ต่ำกว่า
- **ขั้นตอนที่ 12** ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดวนซ้ำ ว่าจำนวนรอบการวนซ้ำเท่ากับรอบการวนซ้ำสูงสุดที่กำหนด (max_iter) หรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการหยุดวนซ้ำ ให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 2

สุดท้ายจะได้ผลเฉลยที่ดีที่สุด (W^*, S^*) ของการวนซ้ำในทุกๆรอบ ซึ่งผลเฉลยนี้จะบ่งบอกถึงปริมาณความจุใช้งานและปริมาณความจุสำรองของแต่ละช่วงการเชื่อมต่อ และค่าจุดประสงค์ของผลเฉลยจะเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการวางความจุในโครงข่าย ส่วนเส้นทางใช้งานของแต่ละคูโหนดก็ได้มาจากขั้นตอนวิธี WPAA ในรอบการวนซ้ำที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดนั่นเอง

ในบทถัดไปจะกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการวางความจุด้วยวิธีที่น่าเสนอ กับวิธี SCA ที่มีการใช้เส้นทางหลักเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด เมื่อมีการพิจารณาค่าสภาพพร้อมใช้งานของโครงข่ายด้วย

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

เนื้อหาในบทนี้เป็น การนำเสนอผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลของวิธีการวางความจุสำรองที่ได้นำเสนอ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ การหาแนวโน้มของการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายในการวางความจุและค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของโครงข่าย

4.1 การชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายในการวางความจุและค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของโครงข่าย

ในส่วนนี้เป็น การทดลองวิธีการวางความจุสำรองที่ได้นำเสนอ (SRLG-JCA-DCA) ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธีการวางความจุสำรองที่ไม่มีการพิจารณาปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน 2 แบบ คือ

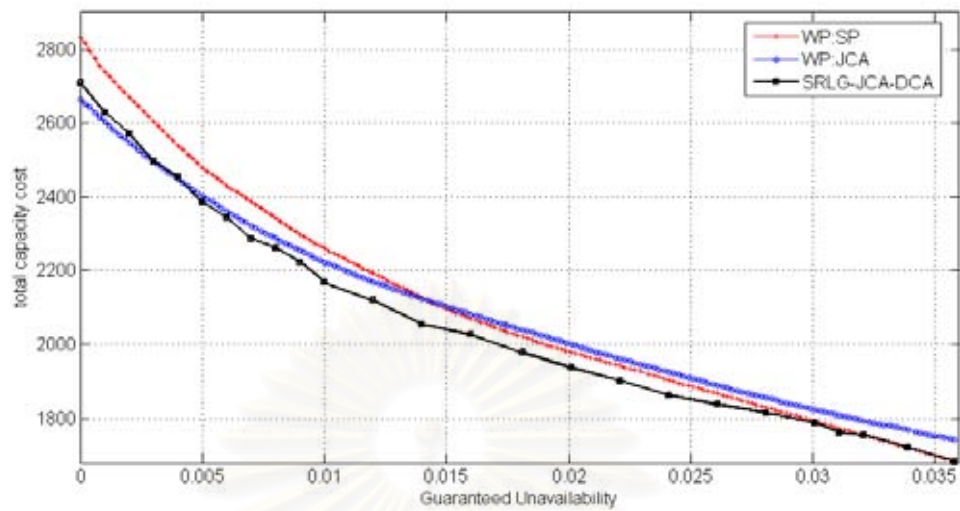
- วิธีที่กำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนว่า WP:SP
- วิธีที่กำหนดให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่ได้จากการวางความจุด้วยวิธี JCA ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนว่า WP:JCA โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการ (2.15) และมีเงื่อนไขบังคับตามสมการ (2.13)–(2.17)

โครงข่ายที่ใช้ในการทดลองนั้นมีความสัมพันธ์ของทอพอโลยีในชั้นกายภาพและชั้นเชิงตรรกะดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีขนาด 11 โหนด 23 ช่วงการเชื่อมต่อ และ 22 ท่อร้อยสาย แต่ละท่อร้อยสายมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งาน (U_e^{phy}) เท่ากันคือ 0.006 โดยกำหนดให้ทุกคูโหนดมีการส่งทราฟฟิกถึงกันหมดแบบสม่ำเสมอ (uniform traffic) และใช้จำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 12 ช่องสัญญาณ ในการทดลองได้กำหนดเงื่อนไขบังคับของการรับประกันค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานว่าการเชื่อมต่อของทุกคูโหนดจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่า U_G และมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

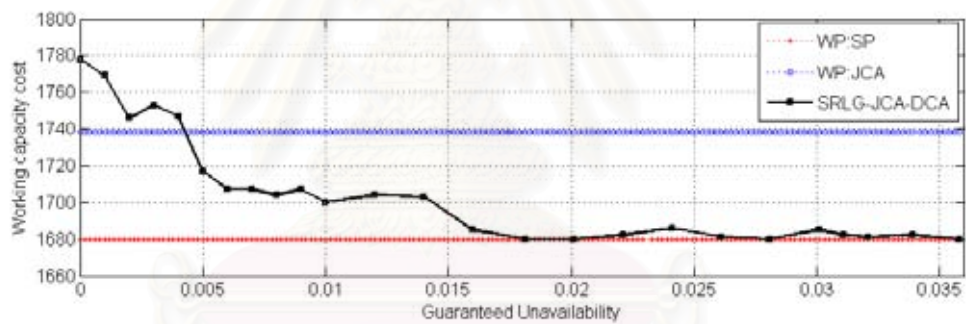
- เสียค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองต่ำที่สุด สำหรับวิธี WP:SP และ WP:JCA ที่มีการกำหนดเส้นทางใช้งานไว้แล้ว
- เสียค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมต่ำที่สุด สำหรับวิธี SRLG-JCA-DCA ตามสมการ (3.8)

เพื่อศึกษาแนวโน้มการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของโครงข่ายและค่าใช้จ่ายจากการวางความจุ จึงทำการปรับเปลี่ยนค่า U_G ตั้งแต่ค่า 0-0.036 เนื่องจากในการวางเส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้น จะได้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางที่ต้อยที่สุดในโครงข่ายก่อนจะทำการวางความจุสำรองเท่ากับ 0.036 ซึ่งก็คือเส้นทางระหว่างโหนด 2 และ 10 ซึ่งผ่านท่อร้อยสายที่ 1, 3, 12, 22, 21 และ 20 ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1

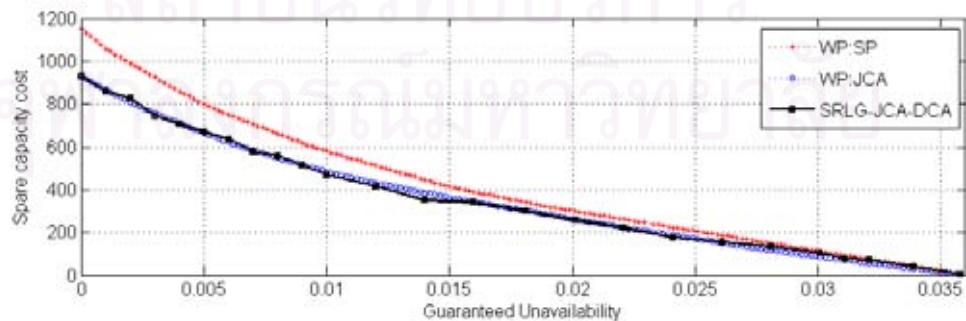
ในรูปที่ 4.1 นั้น แกนตั้งแสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการวางความจุใช้งานและความจุสำรอง ที่ทำให้ทุกคูโหนดในโครงข่ายมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่รับประกันไว้ในแกนนอน ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานของทั้ง 3 วิธี โดยที่วิธี WP:SCA และวิธี WP:JCA ให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุใช้



รูปที่ 4.1 ค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA



รูปที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายในการวางความจุใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA



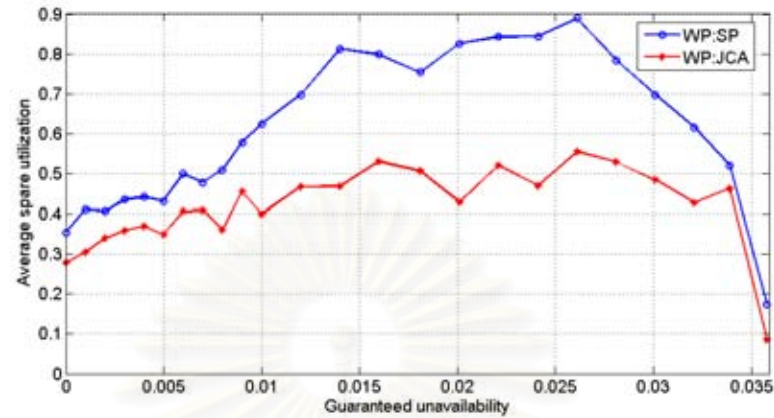
รูปที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA

งานคงที่สำหรับทุกค่า U_G เนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน ซึ่งวิธี WP:SCA เป็นวิธีที่มีการวางความจุใช้งานต่ำที่สุด เนื่องจากกำหนดเส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ส่วนวิธี WP:JCA ที่มีการวางเส้นทางใช้งานที่ได้จากการออกแบบความจุด้วยวิธี JCA ซึ่งมีการกระจายกราฟฟิกไปทั่วโครงข่ายโดยไม่จำเป็นต้องให้เส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้น มีค่าใช้จ่ายของความจุใช้งานสูงกว่า WP:JCA และวิธีการวางความจุที่นำเสนอให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุเปลี่ยนแปลงไปตามค่า U_G ที่กำหนด เนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการลดค่าใช้จ่ายโดยรวม โดยในการทดลองนี้กำหนดขนาดความยาวของตารางตามเท่ากับ 3 ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองของทั้ง 3 วิธีที่เปลี่ยนไปตามค่า U_G ที่กำหนด ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวางความจูดังนี้

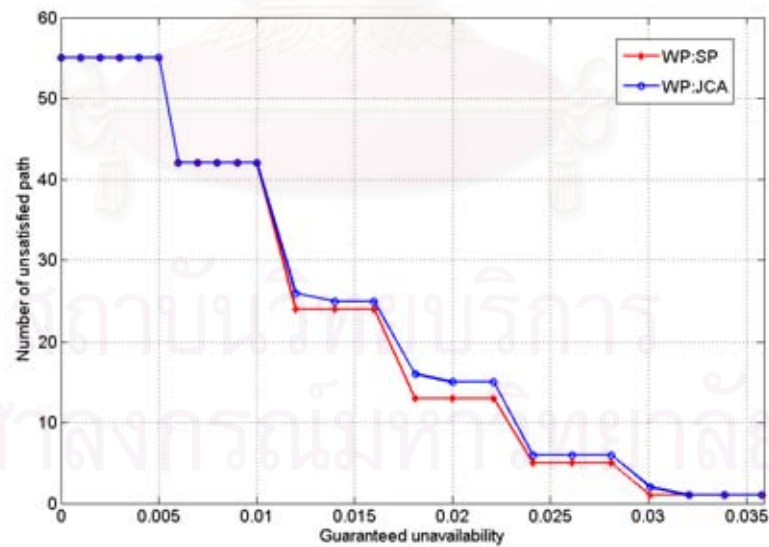
1. เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวางความจุระหว่างวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA พบว่าที่ U_G มีค่าน้อยๆ หรือโครงข่ายมีการรับประกันค่าสภาพพร้อมใช้งานสูง การวางความจุด้วยวิธี WP:JCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าวิธี WP:SP ถึงแม้ว่าจะมีการวางความจุใช้งานสูงกว่าก็ตาม นั่นคือการลดลงของค่าใช้จ่ายโดยรวมนั้นเป็นผลมาจากการลดลงของความจุสำรอง ที่มีปริมาณลดลงมากกว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของความจุใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ซึ่งกราฟในรูปที่ 4.4 บ่งบอกว่าปริมาณความจุสำรองที่ลดลงของวิธี WP:JCA นั้นเนื่องมาจากวิธี WP:JCA ให้ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองโดยเฉลี่ยสูงกว่าวิธี WP:SP หรือมีการใช้ความจุสำรองร่วมกันระหว่างแต่ละความเสียหายได้ดีกว่านั่นเอง

ในทางกลับกัน เมื่อค่า U_G มีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายในการวางความจุสำรองของวิธี WP:JCA จะต่ำกว่าวิธี WP:SP สำหรับทุกค่า U_G แต่เมื่อรวมกับค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานแล้ว ทำให้วิธี WP:JCA กลับให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมสูงกว่าวิธี WP:SCA ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า U_G มีค่าสูงขึ้น ความแตกต่างของปริมาณความจุสำรองของสองวิธีมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของวิธี WP:JCA จะสูงกว่า แต่เนื่องจากการที่มีเส้นทางใช้งานที่ยาวขึ้นกว่าวิธี WP:SP ที่นอกจากจะส่งผลต่อปริมาณความจุใช้งานที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เส้นทางนั้นมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้เส้นทางที่มีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานสูงเกินกว่าค่า U_G มีจำนวนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำให้วิธี WP:JCA มีแนวโน้มของความต้องการปริมาณความจุสำรองเพื่อเพิ่มค่าสภาพพร้อมใช้งานของเส้นทางเหล่านี้

2. เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA พบว่าสำหรับค่า U_G ทุกค่า การวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าวิธี WP:SP เนื่องจากการหาผลเฉลยของ SRLG-JCA-DCA เริ่มจากการใช้ผลเฉลยที่ได้จากวิธี WP:SP เป็นผลเฉลยตั้งต้น และผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานเพื่อปรับปรุงค่าจุดประสงค์ของผลเฉลยซึ่งก็คือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้นจากวิธี WP:SP ดังแสดงในรูป 4.2 แสดงว่าค่าใช้จ่ายที่ลดลงนั้นมาจากการลดปริมาณความจุสำรอง จะเห็นได้จากรูปที่ 4.3 ว่าค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองของวิธี SRLG-JCA-DCA นั้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธี WP:JCA แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายโดยรวมกับวิธี WP:JCA แล้ว



รูปที่ 4.4 ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อโดยเฉลี่ยของวิธี WP:SP เปรียบเทียบกับวิธี WP:JCA

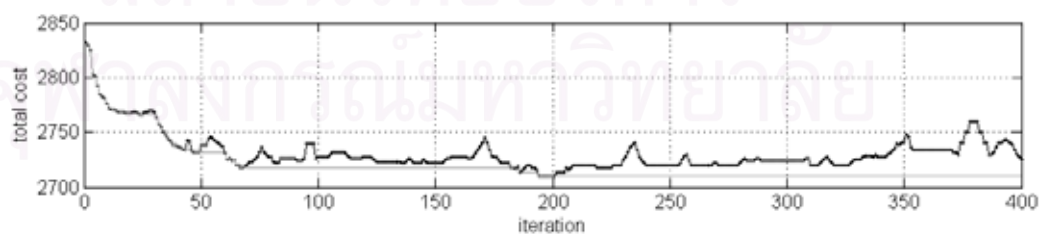


รูปที่ 4.5 จำนวนเส้นทางที่มีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานเกินค่าที่กำหนดก่อนจะมีการวางความจุสำรอง จากการวางเส้นทางใช้งานด้วยวิธี WP:SP เปรียบเทียบกับวิธี WP:JCA

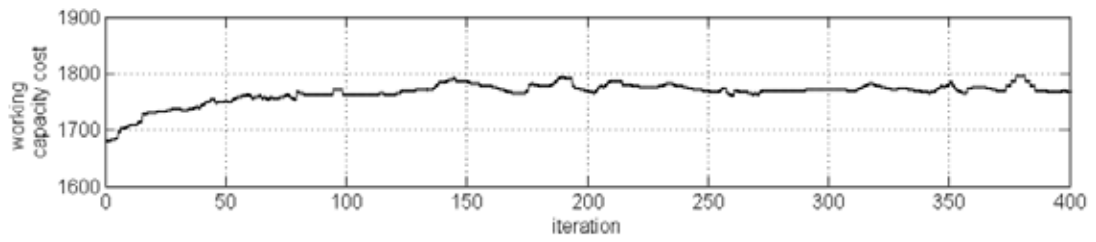
พบว่า เกือบจะทุกค่าของ U_G ที่วิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่า ยกเว้นที่ U_G มีค่าน้อยๆ (0-0.003) ซึ่งที่ค่า $U_G = 0$ หรือโครงข่ายมีอัตราการบูรณะครบ 100 เปอร์เซ็นต์ วิธี WP:JCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุดและได้ผลเฉลยที่เป็นค่าเหมาะที่สุด ซึ่งเป็นผลเฉลยเดียวกับปัญหาการออกแบบการวางความจุแบบ JCA ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

สังเกตจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าที่ค่า U_G มีค่าต่ำ ค่าใช้จ่ายโดยรวมของวิธี SRLG-JCA-DCA ที่มากกว่าวิธี WP:JCA นั้นเป็นผลมาจากค่าใช้จ่ายของการวางความจุใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA มีค่าสูง ในขณะที่ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อลดปริมาณความจุใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA จึงได้มีการกำหนดจำนวนฮอปหรือความยาวของเส้นทางใช้งาน ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนถัดไป

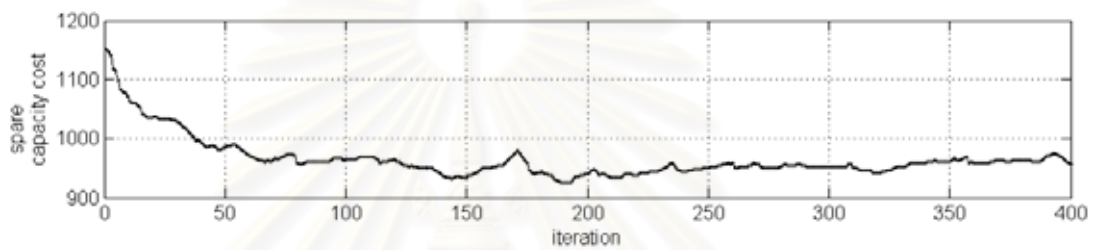
รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวม ค่าใช้จ่ายจากความจุใช้งาน และค่าใช้จ่ายจากความจุสำรองที่ได้ในแต่ละรอบการวนซ้ำระหว่างกระบวนการค้นหาผลเฉลยด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการค้นหาจะได้ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต่ำลงจากการลดลงของปริมาณความจุสำรองที่มีผลมากกว่าการเพิ่มขึ้นของความจุใช้งาน และเป็นไปตามหลักการค้นหาแบบตาม คือมีการยอมรับผลเฉลยที่ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมสูงกว่า เพื่อให้การค้นหามีโอกาสจะได้ผลเฉลยที่ดีขึ้นกว่าผลเฉลยเดิมในรอบถัดๆไป ผลเฉลยที่ดีที่สุดในกรณีนี้เกิดขึ้นในการวนซ้ำรอบที่ 193 จะเห็นได้ว่าการลดลงของปริมาณความจุใช้งานนั้นเนื่องมาจากการปรับปรุงค่าการประโชชน์ความจุสำรอง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองในรอบแรก ก็คือค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองจากการออกแบบด้วยวิธี SCA นั้นเอง แต่หลังจากผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งานแล้ว ทำให้มีการปรับปรุงค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง ส่วนรูปที่ 4.9 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางก่อนการวางความจุสำรอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางในแต่ละรอบการวนซ้ำ มีแนวโน้มเดียวกับค่าใช้จ่ายในการวางความจุใช้งาน นั่นคือ เมื่อเส้นทางใช้งานยาวขึ้น ทำให้ต้องวางความจุใช้งานมากขึ้น และยังส่งผลให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของเส้นทางมีค่าสูงขึ้น



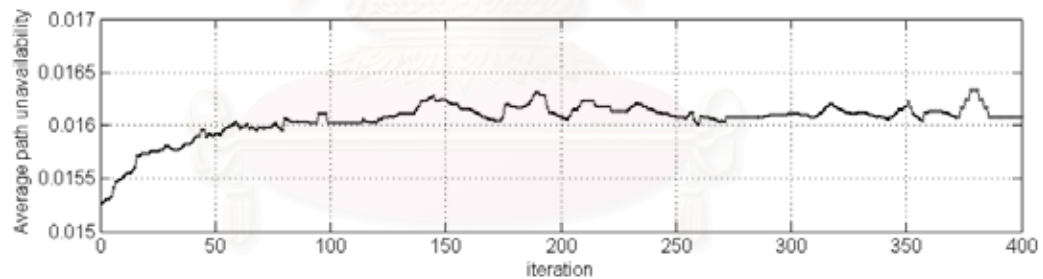
รูปที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุโดยรวมในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3



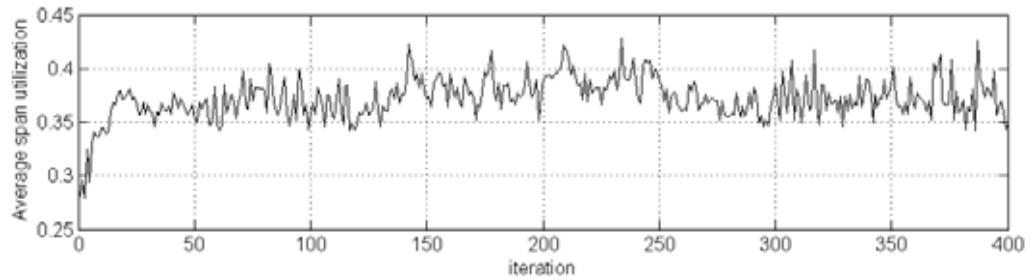
รูปที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3



รูปที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรองในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3



รูปที่ 4.9 ค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3



รูปที่ 4.10 ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของช่วงการเชื่อมต่อโดยเฉลี่ยในแต่ละรอบการวนซ้ำด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ค่า $U_G = 0$ เมื่อกำหนดขนาดของตารางตามเท่ากับ 3

การวางความจุลงในโครงข่ายนั้น นอกเหนือจากการรับประกันว่าทุกเส้นทางใช้งานจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่กำหนดไว้แล้ว ยังต้องทำให้ความจุไปนั้นถูกใช้ประโยชน์มากที่สุด ในแง่ของการลดค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของโครงข่าย ซึ่งเป็นอีกพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพโดยรวมของโครงข่ายตามฟังก์ชันจุดประสงค์ในสมการ 3.8 ในรูปที่ 4.11 แขนงตั้งแสดงค่าเฉลี่ยของสภาพไม่พร้อมใช้งานที่ได้จากการวางความจุทั้ง 3 วิธีเปรียบเทียบกัน เมื่อมีการกำหนดค่า U_G ในแกนนอน ซึ่งผลที่ได้พบว่า

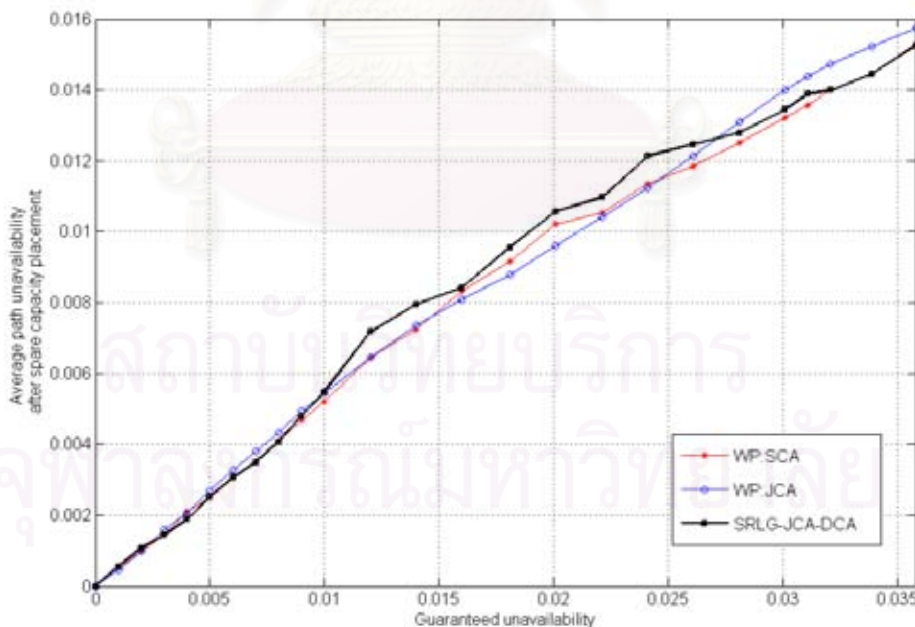
1. เปรียบเทียบค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวางความจุด้วยวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA พบว่าที่ U_G มีค่ามาก วิธี WP:SP ให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยดีกว่า แต่เมื่อค่า U_G ลดลง วิธี WP:JCA กลับให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยดีกว่า จนกระทั่งค่า U_G ลดลงเรื่อยๆจนเท่ากับ 0.01 วิธี WP:SP ก็กลับมาให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยดีกว่าอีกครั้ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีปัจจัยหลายอย่างที่มีความสัมพันธ์กัน ได้แก่

- การกำหนดเส้นทางใช้งาน ซึ่งเป็นการกำหนดค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของแต่ละเส้นทางก่อนการวางความจุสำรอง
- ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรอง ถ้าวัดที่ปริมาณความจุสำรองเท่ากัน วิธีที่ให้ค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองมาก ก็จะมีการปรับปรุงค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยได้มากกว่า
- ปริมาณความจุสำรองที่ต้องวางลงในโครงข่าย ถ้ามีการวางความจุสำรองมาก ก็มีโอกาที่จะปรับปรุงค่าสภาพพร้อมใช้งานได้มากขึ้น

จะเห็นได้ว่าที่ U_G มีค่ามาก ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของวิธี WP:JCA สูงกว่าวิธี WP:SP ก็คือ การกำหนดเส้นทางใช้งานของวิธี WP:JCA ที่มีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยก่อนการวางความจุสำรองเท่ากับ 0.0158 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยก่อนการวางความจุสำรองของวิธี WP:SP ซึ่งเท่ากับ 0.015273 และในกรณีที่ U_G มีค่าสูง ทำให้จำนวนเส้นทางที่มีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานที่เกินค่า U_G มีเพียงแค่หนึ่งหรือสองเส้นทางเท่านั้น ทำให้ต้องการปริมาณความจุสำรอง

เพียงเล็กน้อย จึงสามารถปรับปรุงค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อลดค่า U_G ลง ตั้งแต่ช่วง $UG = 0.016 - 0.024$ พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของวิธี WP:JCA สูงกว่าวิธี WP:SP ก็คือค่าการใช้ประโยชน์ความจุสำรองของวิธี WP:JCA ที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงแม้ว่าปริมาณความจุสำรองของวิธี WP:JCA จะมีน้อยกว่าก็ตาม สำหรับที่ U_G มีค่าต่ำลง ตั้งแต่ 0.005 จนถึง 0.01 พบว่าวิธี WP:SP ให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยดีกว่าวิธี WP:JCA เพียงเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุหลักมาจากปัจจัยของปริมาณความจุสำรองที่ต้องใช้ในวิธี WP:SP ที่มากกว่าวิธี WP:JCA ทำให้มีโอกาสที่หลายๆเส้นทางจะมีการปรับปรุงค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานได้มากขึ้น

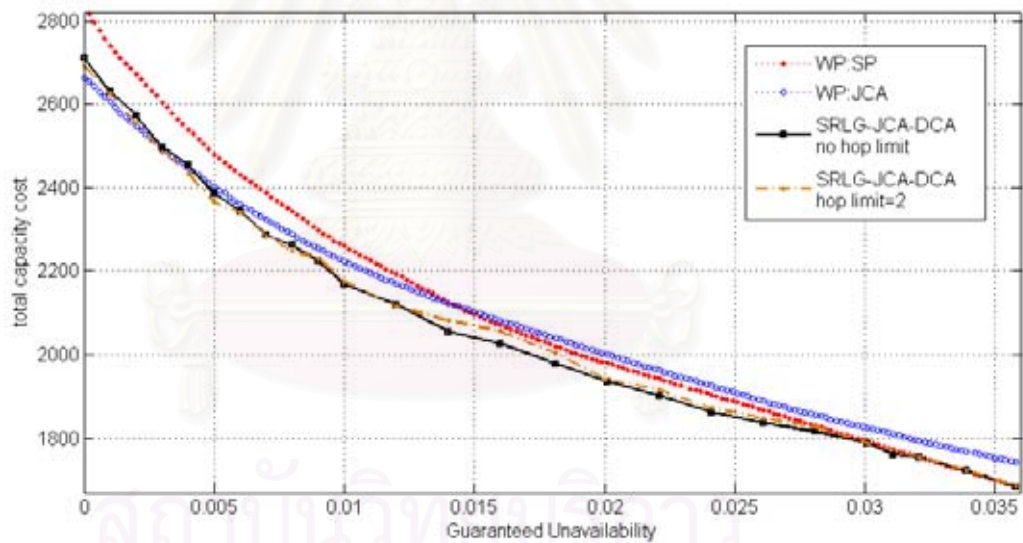
- เมื่อพิจารณาค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA พบว่า ที่ U_G มีค่าสูง ตั้งแต่ 0.032-0.036 และที่ U_G มีค่าต่ำ ตั้งแต่ 0-0.009 ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของวิธี SRLG-JCA-DCA ใกล้เคียงกับวิธี WP:SP มาก แต่่ววิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต่ำกว่า และที่ U_G มีค่ากลางๆ ตั้งแต่ 0.012-0.026 พบว่าวิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด เนื่องจากกระบวนการออกแบบการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA นั้นมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงค่าใช้จ่ายโดยรวมให้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่มีการรับประกันว่าทุกเส้นทางจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่กำหนดเท่านั้น



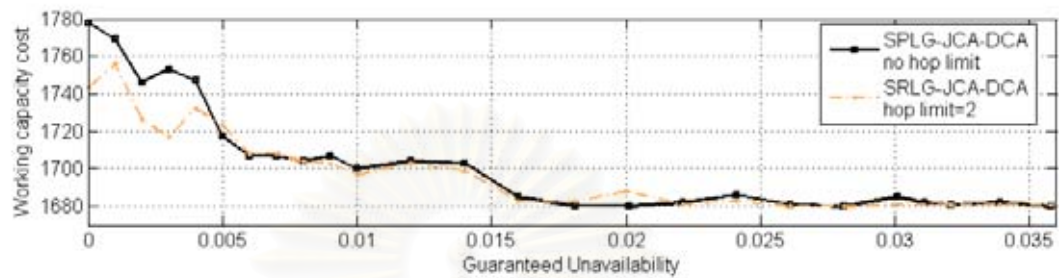
รูปที่ 4.11 ค่า สภาพไม่ พร้อม ใช้งาน โดยเฉลี่ย ที่ได้ จาก การ วาง ความ จุ ด้วย วิธี SRLG-JCA-SCA เปรียบเทียบกับวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA

4.2 ผลจากการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน

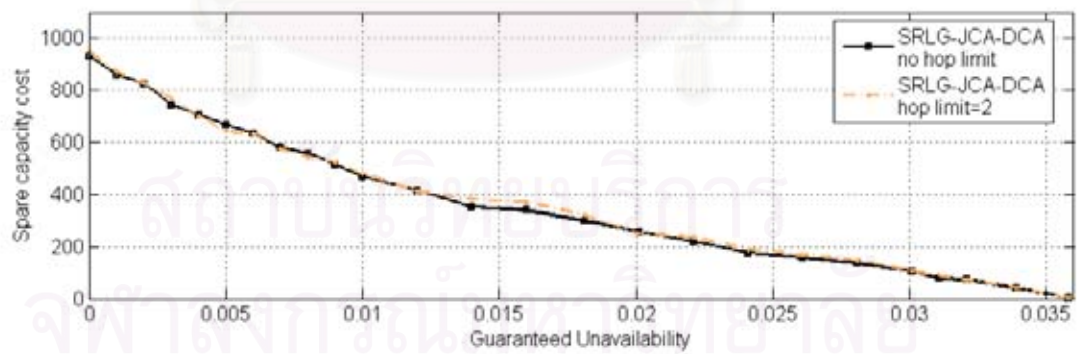
ผลจากการทดลองในส่วนที่แล้วที่ไม่มีกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานในการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน พบว่าที่ค่า U_G มีค่าน้อยๆ การวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA นั้นให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมสูงกว่าวิธี WP:JCA เนื่องจากปริมาณความจุใช้งานที่สูงขึ้นจากการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานที่เป็นเส้นทางเลือกสำหรับการปรับเปลี่ยนเส้นทางว่า สำหรับคูโนดใดๆ ทุกเส้นทางใช้งานที่เป็นไปได้จะต้องมีจำนวนฮอปมากกว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดของคูโนดนั้นไม่เกินค่า m ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ค่า m เท่ากับ 2 และผลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมจากการวางความจุของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อมีการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน ซึ่งพบว่าทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมลดลงเล็กน้อยที่ค่า U_G มีค่าต่างๆ ระหว่าง 0-0.005 ซึ่งค่าที่ลดลงนี้เป็น ผลจากการกำหนดเส้นทางใช้งานไม่ให้มีจำนวนฮอปมากเกินไป ทำให้ปริมาณความจุใช้งานมีค่าไม่สูงเหมือนวิธี SRLG-JCA-DCA ที่ไม่มีกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานนั้นส่งผลต่อปริมาณความจุสำรองน้อยมาก



รูปที่ 4.12 ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุโดยรวมของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อมีการกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน



รูปที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายจากการวางแผนการใช้งานของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อมีกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน



รูปที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายจากการวางแผนสำรองของวิธี SRLG-JCA-DCA เมื่อมีกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานโดยให้ค่า $m = 2$ เปรียบเทียบกับการไม่กำหนดความยาวของเส้นทางใช้งาน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปของวิธีการวางความจุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีออกแบบการวางความจุที่เรียกว่าวิธี SRLG-JCA-DCA สำหรับรองรับความเสียหายในระดับชั้นกายภาพของโครงข่าย ที่ส่งผลให้มีหลายช่วงการเชื่อมต่อเกิดความเสียหายพร้อมกัน ซึ่งวิธีที่นำเสนอเป็นการออกแบบความจุใช้งานร่วมกับความจุสำรอง โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำสุด โดยมีการรับประกันว่าทุกเส้นทางจะมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งในการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการชดเชยข้อดีข้อเสียระหว่างค่าใช้จ่ายในการวางความจุ และค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานของโครงข่าย แต่เนื่องจากการออกแบบนั้นพิจารณาทั้งการวางเส้นทางใช้งานเพื่อรองรับความต้องการส่งทราฟฟิก และพิจารณาการวางความจุสำรองเพื่อรองรับทราฟฟิกจากความเสียหาย ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น จึงได้มีการนำเสนอขั้นตอนวิธีอวิริสติกที่อาศัยหลักการค้นหาแบบตามูมาใช้ในการแก้ปัญหา โดยที่แต่ละรอบของการค้นหาผลเฉลยจะมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน ที่คำนึงถึงการเพิ่มค่าประโยชน์การใช้ความจุสำรองในช่วงการเชื่อมต่อ ส่งผลให้ปริมาณความจุสำรองที่ต้องการลดลง จึงทำให้ปริมาณความจุโดยรวมลดลงด้วย ผลการทดลองของวิธีที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่กำหนดเส้นทางใช้งานไว้ล่วงหน้า โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางใช้งาน 2 วิธี คือ WP:SP และ WP:JCA พบว่า

1. การวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการวางความจุต่ำกว่าวิธี WP:SP ไม่ว่าค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานที่รับประกันไว้ของโครงข่ายจะมีค่าเท่าใดก็ตาม
2. เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายโดยรวมจากการวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA กับวิธี WP:JCA พบว่าวิธี SRLG-JCA-DCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่า ยกเว้นที่ค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานที่รับประกันมีค่าต่ำ หรือโครงข่ายมีอัตราการบูรณะความเสียหายสูง จะทำให้วิธี WP:JCA ให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย
3. การกำหนดความยาวของเส้นทางใช้งานไม่ให้มีจำนวนฮอปมากเกินไป ช่วยให้อัตราการวางความจุลดลง ค่าใช้จ่ายจากการวางความจุใช้งานได้ และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมลดลง
4. การวางเส้นทางใช้งาน นอกจากจะส่งผลต่อปริมาณความจุใช้งานแล้ว ยังมีผลโดยตรงต่อการออกแบบความจุสำรองให้กับโครงข่าย ถ้าการวางเส้นทางใช้งานถูกกระจายไปทั่วโครงข่าย โดยไม่ทำให้ช่วงการเชื่อมต่อใดมีทราฟฟิกที่ถูกผลกระทบจากความเสียหายมากเกินไป ก็จะทำให้การใช้ประโยชน์ความจุสำรองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามถ้าหากเส้นทางใช้งานมีจำนวนฮอปมากเกินไป จะทำให้ค่าสภาพไม่พร้อมใช้

งานที่ได้ก่อนการวางความจุสำรองมีค่าสูง ทำให้ต้องใช้ปริมาณความจุสำรองมากขึ้นในการปรับปรุงค่าสภาพพร้อมใช้งาน

5. การวางความจุด้วยวิธี SRLG-JCA-DCA ถึงแม้จะให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าวิธี WP:SP และวิธี WP:JCA แต่ก็ทำให้ค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของโครงข่ายต่ำกว่า ในบางค่ารับประกันสภาพพร้อมใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการวางความจุที่นำเสนอ นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการวางความจุโดยรวมต่ำที่สุด โดยมีเงื่อนไขบังคับว่าทุกเส้นทางใช้งานต้องมีค่าสภาพไม่พร้อมใช้งานไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ โดยที่ไม่ได้พิจารณาถึงค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของโครงข่าย ดังนั้นจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการ 3.8 สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมไปคูณกับค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยเพื่อเพิ่มค่าสภาพพร้อมใช้งานโดยเฉลี่ยของโครงข่าย
2. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาโครงข่ายที่มีการบูรณะความเสียหายแบบช่วงการเชื่อมต่อ ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการบูรณะความเสียหายในรูปแบบดังกล่าว นั่นคือการย้อนระดับ (loopback) ของเส้นทางใช้งานหลังการบูรณะความเสียหาย นั่นคือเส้นทางใช้งานอาจจะผ่านช่วงการเชื่อมต่อเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้ง ทำให้สิ้นเปลืองความจุในโครงข่าย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ในงานวิจัยขั้นถัดไป ควรจะหาวิธีบูรณะความเสียหายรูปแบบอื่นๆ และสร้างแบบจำลองใหม่ที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

- [1] W. D. Grover. Mesh-Based Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM networking. Prentice Hall (2004).
- [2] C. Edward Chow, J. Bicknell, S. McCaughey and S. Syed. A Fast Distributed Network Restoration Algorithm. Computers and Communications, Twelfth Annual International Phoenix Conference. (March 1993): 261-267.
- [3] R. Kawamura, K. Sato and I. Tokizawa. Self-healing ATM networks based on virtual path concept. Selected Areas in Communications, IEEE Journal. (Jan 1994): 120-127.
- [4] N. D. Lin, A. Zolfaghari and B. Lusignan. ATM virtual path self-healing based on a new path restoration protocol. IEEE GLOBECOM '94. (December 1994): 794-798.
- [5] A. Greca, K. Nakagawa and L. Barolli. A self-healing scheme for ATM networks based on virtual path. Proc. Information Networking, 1998. (ICOIN-12) Twelfth International Conference on. (January 1998): 77-81.
- [6] N.S. Ko, D.Y.Kwak, Y. Kwon and H.S. Park. Hybrid self-healing mechanism with VP priority and dynamic bandwidth assignment policy in ATM networks. IEEE TENCON 99. (September 1999): 751-755.
- [7] M. Patel, R. Chandrasekaran, and S. Venkatesan. A comparative study of restoration schemes and spare capacity assignments in mesh networks. Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Computer Communications and Networks. (October 2003)
- [8] H. Sakauchi, Y. Nishimura and S. Hasegawa. A Self-healing Network With an Economical Spare-channel Assignment. IEEE GLOBECOM '90. (December 1990): 738.443
- [9] M. Herzberg and S.J. Bye. An optimal spare-capacity assignment model for survivable networks with hop limits. IEEE GLOBECOM '94. (December 1994): 1601-1606
- [10] 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.

- [11] R.R. Iraschko, M.H. MacGregor and W.D. Grover. Optimal capacity placement for path restoration in STM or ATM mesh survivable networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. (June 1998): 325-336.
- [12] K. Murakami and H.S. Kim. Optimal Capacity and Flow Assignment for Self-healing ATM networks Based on line and End-to-End Restoration. IEEE/ACM Trans on Networking. (April 1998): 207-221.
- [13] Y. Xiong and L. Mason. Restoration strategies and spare capacity requirements in self-healing ATM network. IEEE proc. INFOCOM '97. (April 1997): 353-360.
- [14] 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.
- [15] Yu Liu. Spare capacity allocation: model, analysis and algorithm, Ph.D. dissertation, School of Information Sciences, University of Pittsburgh. (December 2001)
- [16] M. Clouqueur and W. D. Grover. Mesh-Restorable Networks with Complete Dual Failure Restorability and with Selectively Enhanced Dual-Failure Restorability Properties. OptiComm 2002. (July-August 2002)
- [17] M. Clouqueur and W. D. Grover. Computational and Design Studies on the Unavailability of Mesh-restorable Networks. IEEE/VDE Design of Reliable Communication Networks. (April 2000): 181-186.
- [18] K. Miyazaki, T. Chujo, H. Komine and T. Ogura. Spare Capacity Assignment for Multiple-Link Failures. Advanced Communications and Applications for High Speed Networks, Proc.. (March 1992): 191-197.
- [19] J. Doucette and W. D. Grover. Capacity Design Studies of Span-Restorable Mesh Transport Networks with Shared-Risk Link Group (SRLG) Effects OptiComm 2002. (July-August 2002)
- [20] M. Clouqueur and W.D. Grover. Availability analysis of span-restorable mesh networks. Selected Areas in Communications IEEE Journal. (May. 2002): 810-821.

- [21] W. D. Grover, T. D. Bilodeau, and B. D. Venables. Near optimal spare capacity planning in a mesh restorable network. GLOBECOM'91. (1991): 2007-2012.
- [22] Yu Liu, D. Tipper and P. Siripongwutikorn. Approximating optimal spare capacity allocation by successive survivable routing. IEEE/ACM Transactions on Networking. (Feb. 2005): 198-211.
- [23] 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.
- [24] C.B. Yang and U.P. Wen. Applying Tabu Search to Backup Path Planning for Multicast Networks. Computers & Operations Research. (2005): 2875-2889.
- [25] A. Hertz, E. Taillard, and D. de Werra, A Tutorial on Tabu Search. Proceedings of Giornate di Lavoro AIRO'95. (1992)
- [26] F.Glover and M.Laguna. Tabu Search, Kluwer Academic Publisher. (1997)
- [27] Wayne D. Grover and D. Y. Li. The Forcer Concept and Express Route Planning in Mesh Survivable Networks. Journal of Network and Systems Management. (1999)

บทความทางวิชาการจากวิทยานิพนธ์

- [1] Chaiyachet Saivichit and Kwanta Termsaengsirisak. Spare Capacity Assignment Problem based on a well-known dilemma: Cost vs. Availability. 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28). (November 2004): 837-840



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Spare Capacity Assignment Problem based on a well-known dilemma: Cost vs. Availability

Chaiyachet Saivichit and Kwanta Termsaengsirirak
 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

This paper investigates a spare capacity placement design problem when the span restoration mechanism is activated to handle traffic interrupted by physical conduit failures. The failure scenario that can cause simultaneous failures of many logical spans is particularly considered here because it often occurs in real situations. The main goal of this design is to construct a cost-effective network while maximizing the network availability. The main finding is that the trade-off between network cost and network availability is in non-linear pattern. Moreover, their correlations depend on network topology as well.

Keywords: Spare capacity placement, Network availability, Span restoration

1. GENERAL INFORMATION

In current telecommunication technology, full services that are transparent to the failure are extremely desired. Hence, in the event of failure, interrupted traffic must be rerouted via restoration paths. The existing restoration techniques can be classified as path restoration and span restoration. Path restoration restores the end-to-end channel whereas span restoration restores all affected traffic carried by a failed span facility, as shown in Figure.1. Compared with span restoration, path restoration needs less spare capacity since the restored path in case of path restoration is generally shorter than those of span restoration, but the restoration speed of path restoration mechanism is much slower and more complex. In this paper, as a reason, span restoration is deployed instead of path restoration.

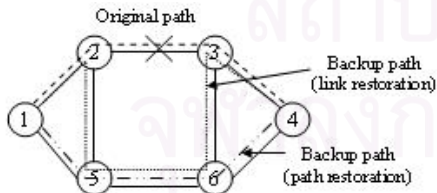


Figure 1. Span and Path Restoration

In fault-tolerant network design problem, spare capacity allocation cooperated with restoration algorithm is the foremost concern. But the question about how much spare capacity should be needed to guarantee the desired level of network dependability under specified failure scenarios is still an open issue. In this paper, the

dependability value is measured in term of “network availability”, which is defined as the probability of network that being found in the operating state at a random time in the future [1]. Many researchers [2], [3] took this definition into account in the design from both customers and network providers’ point of views so as to construct the cost-effective survivable network.

Besides the restoration techniques, failure scenario considered in the design also effect on the amount of spare capacity requirement. In the past research, many different failure scenarios, such as single link failure [4], [5] dual link failure [6], node failure [5], have been considered. But it is important to focus on the “Share Risk Span Group” (SRSG) which is a situation in practice of real networks [1]. In this situation, multiple different logical spans allocated on the same physical conduit or cable tray share the risk of simultaneous disruption. As shown in figure 2, the failure of conduit A can cause the multiple logical span a, b, c, d and e to fail simultaneously.

Overall aim of the study in this paper is to study trade-off between an improvement of network availability and the cost of spare capacity assignment when span restorable network is designed and physical conduit failure scenario is considered. The rest of this paper is organized as follows: In section 2, the calculation of network availability is explained. Spare capacity design problems are proposed in section 3. The results are discussed in section 4. The conclusion is finally presented in section 5.

2. NETWORK AVAILABILITY

2.1. Physical Conduit Availability

Availability of any conduit in the network is the function of the conduit failure rate and its repair time. It can be calculated by a well known equation [1].

$$A_e^{Phy} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

where A_e^{Phy} is the physical availability of conduit e , $MTTF$ and $MTTR$ represent the mean time to failure and mean time to repair respectively. Related to A_e^{Phy} , the physical unavailability of conduit e (U_e^{Phy}) is approximated to $MTTR/MTTF$ because of the fact that $MTTR$ is much smaller than the $MTTF$ [2].

2.2. Physical Span Availability

As stated, we focus on the model of physical layout related to logical span layer, so there are two consequent actions. The first one is that a physical conduit failure always results in the simultaneous failure of all logical spans lying in it. The other is that the logical spans traversing more than one conduit can be found in operation if none of conduit traversed by this span fails. Hence, physical availability of a logical span can be formulated in the same way as availability of components in series system [2], [3]. This can be formed by the following equation

$$A_i^{Phy} = \prod_{e \in L(i)} A_e^{Phy} \approx 1 - \sum_{e \in L(i)} U_e^{Phy} \quad (2)$$

where $L(i)$ is the set of all conduits by which logical span i traverses, A_e^{Phy} is the physical availability of logical span i and U_e^{Phy} is the corresponding physical unavailability of conduit e , $U_e^{Phy} = 1 - A_e^{Phy}$.

2.3. Equivalent Span Availability

When the action of restoration is considered, the span availability could be greater than physical availability. The restoration mechanism that recovers the span failure can continue to service as if there is no failure occurs. The logical span can be in “up” state by either being physically down or being physically down but later rerouted via restoration path [2]. However, there may be some affected traffic that cannot be rerouted because of spare resource limitation. This means that the ability of restoration, which is called “restorability”, significantly affect the equivalent span availability.

Restorability of logical span i affected by the failure of conduit e , denoted by $R_{i,e}$, is defined as

$$R_{i,e} = \frac{W_i - N_{i,e}}{W_i} \quad (3)$$

where w_i represents the affected working channel of span i and $N_{i,e}$ is the total number of unrestorable working channel under failure of span i caused by failure of conduit e .

Now the equivalent unavailability of logical span can be calculated by the following equation.

$$U_i^{eq} = \sum_{e \in L(i)} U_e^{Phy} \left(\frac{N_{i,e}}{W_i} \right) \quad (4)$$

where U_i^{eq} represents the equivalent availability of logical span i when span restoration is considered.

2.4. Path Availability

End-to-end path is constructed by multiple spans connected in series, so it is available only when all spans along this path are found in up state. So the calculation of path availability is not different from the

availability calculation of a logical span that traverses many conduits. In span restorable network, availability of any path q , denoted by A_q , can be computed by

$$A_q = \prod_{i \in S(q)} A_i^{eq} \approx 1 - \sum_{i \in S(q)} U_i^{eq} \quad (5)$$

where $S(q)$ is the set of all logical spans used by path q .

Based on equation (4) and (5), we can rewrite the path unavailability as

$$U_q = 1 - A_q \approx \sum_{i \in S(q)} U_i^{eq} \approx \sum_{i \in S(q)} \sum_{e \in L(i)} U_e^{Phy} \left(\frac{N_{i,e}}{W_i} \right) \quad (6)$$

2.5. Network Availability

It seems meaningless to discuss about the network availability as a whole because all services provided by network are neither entirely up nor entirely down [3]. To achieve the availability characteristic of network, two metrics based on the overall paths unavailability are proposed. The first metric is the maximum path unavailability guarantee. This metric, which is meaningful for the users’ perspective, ensure that the worst path unavailability does not exceed this guarantee value. The other one related to network providers’ perspective is the number of users that meets with the availability requirement. In this paper, these two metrics are both used in the design with the cost of spare capacity placement.

3. PROBLEM FORMULATION

In this section, mathematic model is formulated in order to optimize the spare capacity placement when working demands are already routed on the shortest path between each O-D pair. The IP formulation employs the following notations:

- E : Set of all physical conduits in the network
- I : Set of all logical spans in the network
- U_e^{Phy} : Physical unavailability of conduit e
- Q : Set of all working paths supporting O-D pairs
- W_i : Number of working capacity on span i
- $\mu_{i,e}$: Equals 1 if logical span i traversing physical conduit e , 0 otherwise
- η_i^q : Equals 1 if working path q uses logical span i , 0 otherwise
- $P_{i,e}$: Set of all possible paths for restoration of span i when conduit e fails. These paths must not use any span that share the common conduit e .
- $f_{i,e}^p$: Restoration flow assigned to restoration path p for span i when conduit e fails

- $\delta_{i,k}^p$: Equals 1 if restoration path p for span i use span k , 0 otherwise
- C_k : Unit cost of spare capacity on span k
- S_k : Number of spare capacity placed on span k
- U_G : Maximum Path Unavailability in the network
- A_{req} : Path availability requirement, $U_{req} = 1 - A_{req}$
- X : Number of users that cannot meet the availability requirement

Problem 1: Minimize the maximum path unavailability

The objective function is

$$\text{Minimize } U_G$$

Subject to:

$$\sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \leq w_i \mu_{i,e} \quad \forall i \in I, \forall e \in E \quad (7)$$

$$N_{i,e} = w_i \mu_{i,e} - \sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \quad \forall i \in I, \forall e \in E \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{e \in E} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{W_i} \right) \eta_i^q \mu_{i,e} \leq U_G \quad \forall q \in Q \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_{i,e}} f_{i,e}^p \delta_{i,k}^p \mu_{i,e} \leq S_k \quad \forall k \in I, \forall e \in E \quad (10)$$

$$\sum C_k S_k \leq \text{Budget} \quad \forall k \in I \quad (11)$$

The set of constraints in (7) force that the restoration flows for any span must not exceed the working capacity affected by the failure of that span. Constraints in (8) determine unrestorable channels for any span i failure caused by failure of conduit e . The left term of constraint (9) represents the availability of any path q which is not worse than the guaranteed level. Constraint sets (10) ensure enough spare capacity on each span for supporting the traffic affected by simultaneous other multiple span failures. The last constraint (11) limits the budget of spare capacity placement.

Problem 2: Minimize the number of users that cannot meet the availability requirement

The objective function is

$$\text{Minimize } X = \sum_{q \in Q} X_q$$

Subject to constraint (7), (8), (10), (11) and the following additional constraints

$$U_{req} - \left(\sum_{i \in I} \sum_{e \in E} U_e^{phy} \left(\frac{N_{i,e}}{W_i} \right) \eta_i^q \mu_{i,e} \right) + X_q \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (12)$$

$$X_q \in (0,1) \quad \forall q \in Q \quad (13)$$

Constraint (12) force X_q equal to one if availability of path q is more than U_{req} . This means that path q does not meet the availability requirement.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In this experiment, two problems in the previous section are solved. Both of them are formulated to optimum only spare capacity placement when each demand pair uses the shortest path as its working path. The objective of the first problem is to minimize the maximum path unavailability when limiting the budget. Two different networks, A and B, shown in figure 2 and figure 3 are tested. The demand patterns of all node pairs are uniform. To investigate the trend of the worst path unavailability, the budget for spare capacity placement is varied. The budget is similarly represented in term of Spare Capacity Requirement, which is here defined as the ratio of total spare capacity cost used in the design to meet the availability requirement and the total working capacity cost. According to the result shown in figure 4, these two different network topologies require spare capacity differently to achieve the same level of availability requirement. Connectivity of network A, which is equal to 4.2, is more than 3.5 of network B. Consequently, restoration paths in network A are generally shorter. Moreover, network A can bear the advantage in spare capacity sharing because it seems to be more symmetric than network B. This can be noted that network topology is a prime factor of spare capacity requirement.

Another conclusion obtained from this experiment is that spare capacity cost nonlinearly and rapidly increases when the design is trying to achieve very high value of availability (>99.9%).

The goal of second experiment is to study the trade-off between number of users that satisfied the availability service and spare capacity requirement. Network A is tested and six availability levels, 98%, 98.5%, 99%, 99.5, 99.9%, 99.999%, are analyzed. The result shown in Figure 5 clearly indicates that all users can achieve availability requirement in all cases with reasonable cost even though there is some failure scenario that cause five logical spans to fail and they must be restored simultaneously.

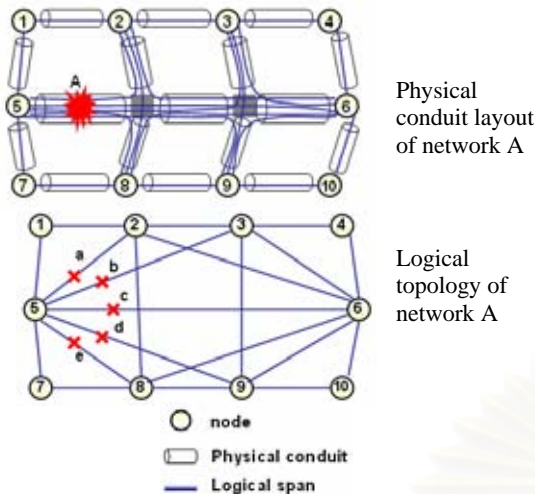


Figure 2. Network A
(10 nodes, 17 physical conduits, 21 logical spans)

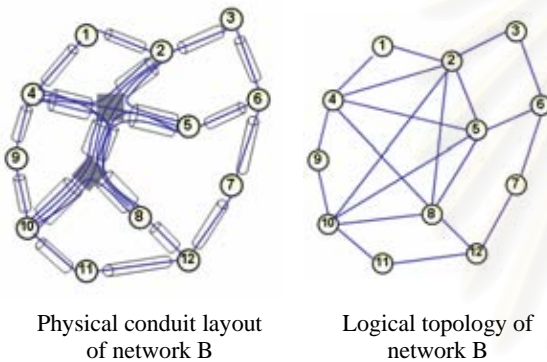


Figure 3. Network B
(12 nodes, 18 physical conduits, 21 logical spans)

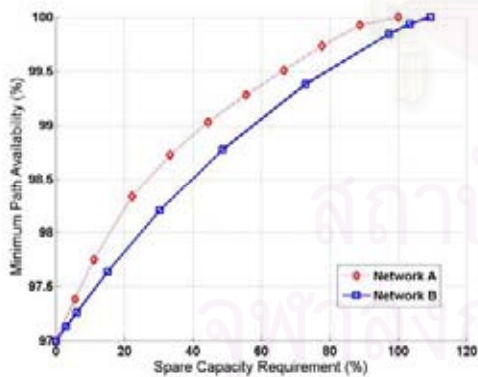


Figure 4. Minimum path Availability vs. Spare Capacity requirement

5. CONCLUSION

This paper presents an IP formulation for spare capacity assignment problem by using span restoration when physical conduit failure is considered. Network

availability metric is taken into account in the design in order to provide not only the user satisfactions, but also the economical budget for network providers. We have found that the increment in expenditure of implementing spare capacity in order to raise the availability of the network is in a non linear pattern – at some points, the costs is high however the availability improvement is finely adjustable. Therefore, it is not always worthwhile to do that. The important means in order to make a design model is to find the good amount of increasing expenses that make the availability value as an acceptable indicator. This correlation does depend on the network topology as well.

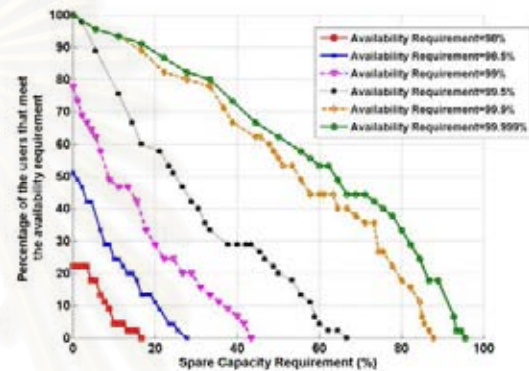


Figure 5. Percentage of users that meet the availability requirement vs. Spare Capacity requirement

6. REFERENCES

- [1] W. D. Grover, *Mesh-Based Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM networking*, Prentice Hall, 2004.
- [2] M. Clouqueur, W.D. Grover, "Availability analysis of span-restorable mesh networks," *Selected Areas in Communications IEEE Journal*, vol.20, May 2002, pp. 810-821.
- [3] M. Clouqueur, W. D. Grover, "Computational and Design Studies on the Unavailability of Mesh-restorable Networks," *IEEE/VDE Design of Reliable Communication Networks*, Apr. 2000, pp. 181-186.
- [4] 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.
- [5] M. Herzberg, S.J. Bye, A. Utano, "The hop-limit approach for spare-capacity assignment in survivable networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, Issue 6, Dec.1995, pp. 775 – 784.
- [6] M. Clouqueur, W. D. Grover, "Mesh-Restorable Networks with Complete Dual Failure Restorability and with Selectively Enhanced Dual-Failure Restorability Properties," *OptiComm 2002*, July-August 2002.
- [7] K. Miyazaki, T. Chujo, H. Komine, T. Ogura, "Spare Capacity Assignment for Multiple-Link Failures," *Advanced Communications and Applications for High Speed Networks, 1992. Proc.*, Mar. 1992, pp. 191-197.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ขวัญตา เต็มแสงสิริศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา
ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนช่างตาครู้สคอนแวนต์ในปี พ.ศ. 2540 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จนสำเร็จหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในปี พ.ศ. 2545
ก่อนที่จะเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปี
พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย