โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 13
เรื่อง การศึกษาโดยวิกฤตเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายสื่อสาร ปีที่ 4

การบูรณะโครงข่ายโดยใช้ค่าปัจจัยการกระจายโหลดเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับค่าสมรรถนะความอยู่รอดของโครงข่าย

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันทั้งในด้านธุรกิจ การค้าขาย การประชุม และการบันเทิง เนื่องมาจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีการสื่อสารในปัจจุบันทำให้ผู้ใช้บริการสามารถส่งข้อมูลที่ต้องการติดต่อในปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว ไม่เพียงข้อมูลตัวหนังสือ หรือเสียงธรรมดาเท่านั้น ยังรวมไปถึงสัญญาณมัลติมีเดียต่างๆ ทั้งรูปภาพ วีดีทัศน์ ระบบการประชุมทางไกล สัญญาณเหล่านี้ต้องการอัตราข้อมูลและความถูกต้องในการรับส่งข้อมูลสูง อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณที่มีอยู่จำกัดอีกด้วย ส่งผลให้ข้อมูลข่าวสารที่ใช้ติดต่อนั้นมีความสำคัญมากขึ้น หากว่าข่าวสารนั้นขาดหายไปเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้เกิดผลเสียได้ การออกแบบโครงข่ายให้สามารถรองรับกับปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอเป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบโครงข่ายแต่สิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วยคือ ความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) ของโครงข่ายสื่อสารเพราะผู้ใช้งานต้องการความต่อเนื่องของการติดต่อสื่อสาร ถึงแม้ในกรณีที่อุปกรณ์ของโครงข่ายเกิดความเสียหายหรือชำรุดขึ้นก็ยังสามารถใช้บริการต่อได้โดยที่คุณภาพของบริการไม่ได้ลดลงเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ ความสามารถในการบริการของโครงข่ายหลังจากความเสียหายที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า ความอยู่รอดของโครงข่าย (Network survivability) [1]-[4]

เมื่อมีอุปกรณ์ของโครงข่ายได้รับความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ดีต้องทำให้โครงข่ายมีความทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น (Fault-tolerant network) โดยเฉพาะเมื่อสายใยแก้วถูกตัดขาดซึ่งเป็นความเสียหายที่พบบ่อยที่สุด ดังนั้นวิธีที่จะยกระดับความอยู่รอดของโครงข่ายได้ก็คือต้องมีวิธีจัดการกับความเสียหายอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้เส้นทางสำรอง (Backup path) เพื่อรองรับผลกระทบจากความเสียหายของทราฟฟิกใช้งาน โดยต้องมีกระบวนการสร้างเส้นทางป้องกัน (Protection process) และเส้นทางบูรณะ (Restoration process) ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้การใช้ความจุที่วางลงไปนั้นเกิดประโยชน์มากที่สุด ในงานวิจัย [5] ได้กล่าวถึงความเชื่อมโยงกันของการป้องกันและ

การบูรณะแบบต่างๆ ด้วยการอธิบายให้เห็นถึงกลไกการทำงานโดยรวมของการสร้างเส้นทางสำรองทั้งสองแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเป็นการสร้างเส้นทางสำรองแบบป้องกันหรือบูรณะก็ย่อมมีความเกี่ยวข้องกับความจุที่วางในโครงข่ายทั้งสิ้น ดังที่พบได้จากงานวิจัย [6]-[7] ซึ่งได้เปรียบเทียบให้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากความจุใช้งานและความจุสำรองที่วางลงไปทั้งในแง่ของการลดค่าใช้จ่ายและการเพิ่มค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำสำหรับการป้องกันเปรียบเทียบกับการบูรณะ [7] และเปรียบเทียบระหว่างการบูรณะวิธีต่างๆ [5], [6] เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์และมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัย [8] ได้ปรับปรุงการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงให้เหมาะกับการนำไปใช้ด้วยการแบ่งโครงข่ายเป็นโครงข่ายย่อยซึ่งแสดงถึงเซตของโนดและข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกับการบูรณะหากมีความเสียหายเกิดขึ้น โดยอาศัยการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดและการหาการไหลที่มากที่สุด [9] ในการกำหนดเส้นทางบูรณะ [10] ซึ่งวิธีนี้อาจทำให้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่อยู่โดยรอบความเสียหายถูกใช้จนเต็ม ส่งผลให้ข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้มีความเปราะบาง (Vulnerability) อาจเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าปกติ ส่วนในงานวิจัย [11] และ [12] ได้ออกแบบการสร้างเส้นทางบูรณะจากการพิจารณาความจุสำรองของแต่ละเส้นทางที่ได้เตรียมไว้ด้วยวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแตกต่างจากงานวิจัย [13] และ [14] ที่จะกำหนดขีดแบ่ง (Threshold) ของเส้นทางบูรณะในการจองความจุสำรองก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกไปยังเส้นทางดังกล่าว วิธีบูรณะในงานวิจัย [15] เป็นการออกแบบการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบผสมคือใช้คู่โนดที่อยู่ถัดจากความเสียหายไปหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ (Hop) เป็นคู่โนดที่เชื่อมต่อเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นหรือในอีกมุมมองหนึ่งเป็นการกระจาย ทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบออกจากจุดเสียหายนั่นเอง ซึ่งสามารถลดการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงบริเวณโดยรอบความเสียหายลงได้และยังลดโอกาสที่จะทำให้เกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ความจุสำรองจนหมดได้อีกด้วย

จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าในด้านของการวางความจุใช้งานและความจุสำรองของโครงข่ายพบว่าในการออกแบบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับการสร้างเส้นทางสำรองโดยตรงนั่นคือค่าใช้จ่ายในการออกแบบขึ้นอยู่กับการสร้างเส้นทางสำรองด้วย ดังเช่นในงานวิจัย [16] และ [17] ที่ได้ออกแบบการวางความจุสำรองโดยกำหนดเส้นทางใช้งานเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด แต่ในงานวิจัย [18], [19] พบว่าการวางความจุด้วยวิธีดังกล่าวไม่สามารถทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่ำที่สุดได้ จึงได้เสนอการวางความจุใช้งานและความจุสำรองไปพร้อมกันโดยในการวางความจุสำรองนั้นมีจุดมุ่งหมายคือต้องการให้เกิดการใช้ความจุสำรองร่วมกันหรือการเพิ่มค่าใช้งานความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำ [20] ของแต่ละรูปแบบความเสียหายให้มากที่สุดโดยการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ให้มากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการวางความจุสำรอง ซึ่งมีการ

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

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

การกระจายโหลดที่กล่าวข้างต้นจึงน่าจะมีประโยชน์สำคัญในแง่ของการเพิ่มค่าความอยู่รอดของโครงข่ายในด้านการใช้ความจุสำรองให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดความเปราะบางที่อาจเกิดขึ้นกับโครงข่ายด้วย จากงานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงที่กล่าวข้างต้นไม่ได้พิจารณาถึงการกระจายโหลด ซึ่งเป็นประโยชน์สำคัญในด้านการออกแบบโครงข่าย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการบูรณะที่พิจารณาการกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบเหล่านี้ซึ่งแบ่งได้สามรูปแบบ

- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด (Load Weight Restoration scheme) จะกระจายทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง (Link Utilization) ต่ำให้มากที่สุด

- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง (Spare capacity Weight Restoration scheme) วิธีนี้จะกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ (Available Spare capacity) ของแต่ละเส้นทาง

- วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลดและความจุสำรอง (Load and pare capacity Weight Restoration scheme) วิธีนี้เป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีการข้างต้นเข้าด้วยกันคือการกระจายโหลดและการใช้ความจุสำรองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะกระจายทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำที่สุดและสัดส่วนของทราฟฟิกที่กระจายไปยังแต่ละเส้นทางนั้นก็เป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ด้วย

สิ่งสำคัญอีกประการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจคือการออกแบบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อแสดงวัดความอยู่รอดของโครงข่าย ที่แสดงถึงการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำของอัลกอริธึมหรือวิธีการที่ใช้ในการบูรณะ โดยคำนึงถึงค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง (Link utilization) ภายหลังการเกิดความเสียหายเป็นส่วนสำคัญ

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 การวิเคราะห์ความอยู่รอดของโครงข่าย

ความอยู่รอดของโครงข่าย (Network Survivability) [1], [2] คือความสามารถของโครงข่ายที่จะป้องกันและปกป้องตนเองให้สามารถใช้งานได้ภายใต้สภาวะความเสียหายหลายระดับ โครงข่ายที่ดีนั้นต้องได้รับการออกแบบให้มีความจุสำรองที่มีปริมาณมากเพียงพอที่จะจัดการกับรูปแบบความเสียหายที่คาดการณ์ไว้ได้อย่างเหมาะสมและทำให้ผลกระทบที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นน้อยที่สุด ค่าความอยู่รอดของโครงข่ายสามารถแสดงได้ในรูปของ ค่าความสามารถในการบูรณะความเสียหาย (Restorability) หรืออัตราการบูรณะ (Restoration ratio) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้เป็นมาตรฐานสำคัญสำหรับการบูรณะ และการวิเคราะห์ความอยู่รอดของโครงข่าย (Analysis of Survivability) สามารถพิจารณาตามรูปแบบการเกิดความเสียหายได้ดังนี้ [1],[4]

2.1.1 ระบุการเกิดความเสียหาย (Given occurrence of failure)

วิธีการนี้ได้มีการคาดการณ์ความเสียหาย และทำการระบุสัดส่วนของทราฟฟิก (Traffic) ที่ต้องได้รับการบูรณะหรือระดับความอยู่รอดที่ต้องการไว้ล่วงหน้า แล้วจึงทำการบูรณะให้ได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ วิธีการนี้จะง่ายต่อการประเมินค่าความอยู่รอดเนื่องจากจะกำหนดรูปแบบ

2.1.2 สุ่มการเกิดความเสียหาย (Random occurrence of failure)

วิธีการนี้จะพิจารณาว่าความเสียหายสามารถอธิบายได้ด้วย ตัวแปรสุ่ม (Random variable) จากการกำหนดฟังก์ชันการกระจายความน่าเป็น (Probability Distribution Function) ของความเสียหาย (Failure), อัตราการซ่อมหรือการบูรณะ เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่แสดงถึงคุณลักษณะต่างๆของโครงข่าย

2.2 การบูรณะความเสียหายระดับข่ายเชื่อมโยง (Link Restoration)

เนื่องจากวิธีการนี้ไม่มีการเตรียมเส้นทางสำรองไว้ล่วงหน้า การสร้างเส้นทางสำรองนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อคู่โนดที่อยู่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายสามารถตรวจจับ (Detect) ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ คู่โนดดังกล่าวจะทำการกระจายข้อมูล (Flooding) ไปทั่วโครงข่ายเพื่อหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความจุสำรองว่างอยู่ หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายทั้งหมดไปยังเส้นทางสำรองที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งการบูรณะความเสียหายลักษณะนี้ไม่มีการแย่งกันใช้ความจุสำรอง เพราะการหาเส้นทางสำรองถูกทำโดยคู่โนดเพียงคู่เดียว

ในด้านของการสร้างเส้นทางสำรองระดับข่ายเชื่อมโยงนั้นการแย่งชิงความจุสำรอง (Capacity contention) มีน้อยกว่าและการหาเส้นทางเป็นไปอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระดับเส้นทาง (Path restoration) อีกทั้งหากใช้เป็นการบูรณะแบบวางแผน (Preplanned restoration) ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของการบูรณะดีขึ้นได้อย่างมาก แต่ปัญหาที่เกิดกับการบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงคือการกระจายโหลด (Load distribution) ไม่สามารถทำได้ดีเท่ากับการบูรณะระดับเส้นทาง ซึ่งจะทำการจัดสรรเส้นทางเดินของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของแต่ละคู่โนดสื่อสารใหม่ทั้งหมด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาการบูรณะแบบวางแผนระดับข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากมีความรวดเร็วในการหาเส้นทางและไม่เกิดการแย่งกันใช้ความจุสำรอง โดยให้ความสนใจในการแก้ปัญหาการกระจายโหลดของวิธีนี้ให้ดียิ่งขึ้น

3. การออกแบบวิธีการบูรณะและดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพที่นำเสนอ

3.1 แบบจำลองโครงข่าย (Network model)

กำหนดให้ความจุใช้งานและความจุสำรองของโครงข่ายแยกกันและทราบค่าแล้วในหน่วยช่องสัญญาณ ส่วนความต้องการส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดสื่อสารมีค่าคงที่และเส้นทางใช้งานที่เชื่อมต่อระหว่างคู่โนดเลือกใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) เพียงหนึ่งเส้นทาง เส้นทางสำรองที่จะใช้เป็นเส้นทางบูรณะจะกำหนดไว้ล่วงหน้าและเก็บเป็นข้อมูลไว้ที่โนดที่เชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง l^* ใดๆ ที่อาจได้รับความเสียหาย เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นจึงส่งสัญญาณไปตามเส้นทางที่ระบุไว้เพื่อจองความจุสำรอง ต่อจากนั้นจึงเชื่อมต่อทราฟฟิกที่เสียหายไปยังเส้นทางบูรณะ โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

$G(V,E)$	กราฟแสดงทอพอโลยีและแสดงเซตของ $\|V\|$ โนดและ $\|E\|$ ข่ายเชื่อมโยง
wc_l	ปริมาณความจุใช้งานที่ใช้งานได้สูงสุดของข่ายเชื่อมโยง l
sc_l	ปริมาณความจุสำรองที่ใช้งานได้สูงสุดของข่ายเชื่อมโยง l
H	ขีดจำกัดช่วงเชื่อมต่อ (Hop limit)
$P_h^{l^*}$	เซตของเส้นทาง p ทั้งหมดที่มีความยาว h ช่วงเชื่อมต่อ ที่เชื่อมระหว่างโนดที่เชื่อมกับข่ายเชื่อมโยง l^*
$L_p^{l^*} = \{l_1, l_2, ..., l_n\}$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในเส้นทาง p
$R^{l^*} = \{r_1, r_2, ..., r_k\}$	เซตของเส้นทางบูรณะทั้งหมด k เส้นทาง
$L_{r,i}^{l^*} = \{l_1, l_2, ..., l_n\}$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในเส้นทางบูรณะ r_i
$\rho_{wc,l}$	ความจุใช้งานที่ถูกใช้โดยทราฟฟิกใช้งาน (Working traffic) ของข่ายเชื่อมโยง l
$\rho_{sc,l}^{l^*}$	ความจุสำรองที่ถูกใช้โดยทราฟฟิกที่ถูกบูรณะ (Restored traffic) ของข่ายเชื่อมโยง l สำหรับความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^*
ρ_l^r	ความจุที่ถูกใช้งานโดยทราฟฟิกใช้งาน (Working traffic) และทราฟฟิกที่ได้รับการบูรณะ (Restored traffic)
$\gamma_{i,l}^{l^*}$	• มีค่าเป็น 1 ถ้าเส้นทางบูรณะ r_i สำหรับความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง l^* ผ่านข่ายเชื่อมโยง l • มีค่าเป็น 0 ถ้าไม่ผ่าน

3.2 **วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด** (Load Weight Restoration scheme: LWR)

วิธีที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าเป็นการออกแบบที่อยู่ในกลุ่มของการบูรณะแบบวางแผน มีจุดประสงค์คือทำให้ค่าทราฟฟิกของโครงข่ายมีความสมดุลมากขึ้นจากการบูรณะทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการตัดสินใจเลือกเส้นทางบูรณะนั้นสามารถทำได้หลายแนวทาง นอกจากการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและสามารถบูรณะทราฟฟิกได้สูงสุดแล้ว การหาค่าการไหลที่มากที่สุด (Maximum Flow) จากการเลือกเส้นทางที่มีการใช้งานน้อยก่อนจะทำให้ปัญหาความคับคั่ง (Congestion) ของข่ายเชื่อมโยงลดลงได้ โดยวิธี LWR มีตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของวิธี LWR

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

3.2.1**ส่วนสร้างเส้นทาง**

เริ่มต้นด้วยการหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ที่เชื่อมต่อระหว่างคู่โนดที่ต่อกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งมีความยาว 2 ถึง H ช่วงเชื่อมต่อแล้วบันทึกไว้ที่เซต $P_2^{l^*}, ..., P_H^{l^*}$ ตามลำดับ โดยอาศัยอัลกอริธึม “Modified Depth First Search” [7] ดังแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นจึงเริ่มต้นหาค่า Busy Factor ที่แสดงถึงค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายหรือก่อนทำการบูรณะของทุกเส้นทางที่บันทึกไว้ข้างต้น และสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1)

$$B_p^{l^*} = \max_{\forall l \in L_p^{l^*}} \left(\frac{\rho_{wc,l}}{wc_l + sc_l} \right) \quad (1)$$

จากนั้นทำการจัดเรียงเส้นทางใหม่ตามลำดับของค่า Busy factor จากน้อยไปหามากแล้วทำการบันทึกเส้นทางที่จัดเรียงไว้ที่เซต $P_{order}^{l^*}$ เพื่อให้ความสำคัญในการหาค่าการไหลแก่เส้นทางที่มีค่าใช้งานต่ำที่สุดก่อน เนื่องจากเส้นทางที่ได้รับโอกาสในการหาค่าการไหลก่อนนั้นมีโอกาสที่จะได้ใช้ความจุสำรองที่มีก่อน ความจุสำรองที่เหลือจากการใช้ในขั้นแรกจึงเป็นโอกาสของเส้นทางที่จะหาการไหลในขั้นตอนถัดไป ต่อไปจึงเริ่มการหาค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเส้นทาง p_{order} ($f_{p_{order}}^{l^*}$) แล้วทำการบันทึกเส้นทางที่สามารถหาค่าการไหลได้ ($f_{p_{order}}^{l^*} > 0$) เป็นเซตของเส้นทางบูรณะ (R^{l^*}) ซึ่งการไหลที่หาได้จากอัลกอริธึมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่น้อยที่สุดของปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ในข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ในเส้นทางบูรณะเดียวกันดังแสดงในสมการ (2) ดังนั้นผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเซตของเส้นทางบูรณะสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3) และต้องคำนวณเพื่อหาค่าการไหลทั้งหมด $\left|P_{order}^{l^*}\right|$ ครั้ง

$$f_{p_{order}}^{l^*} = \min_{\forall l \in L_{order}^{l^*}} \left(sc_{l,p_{order}-1} \right) \quad ; sc_{l,0} = sc_l \tag{2}$$

$$F_R^{l^*} = \sum_{i=1}^{k} f_{r,i}^{l^*} \tag{3}$$

3.2.2 **ส่วนกำหนดทราฟฟิก**

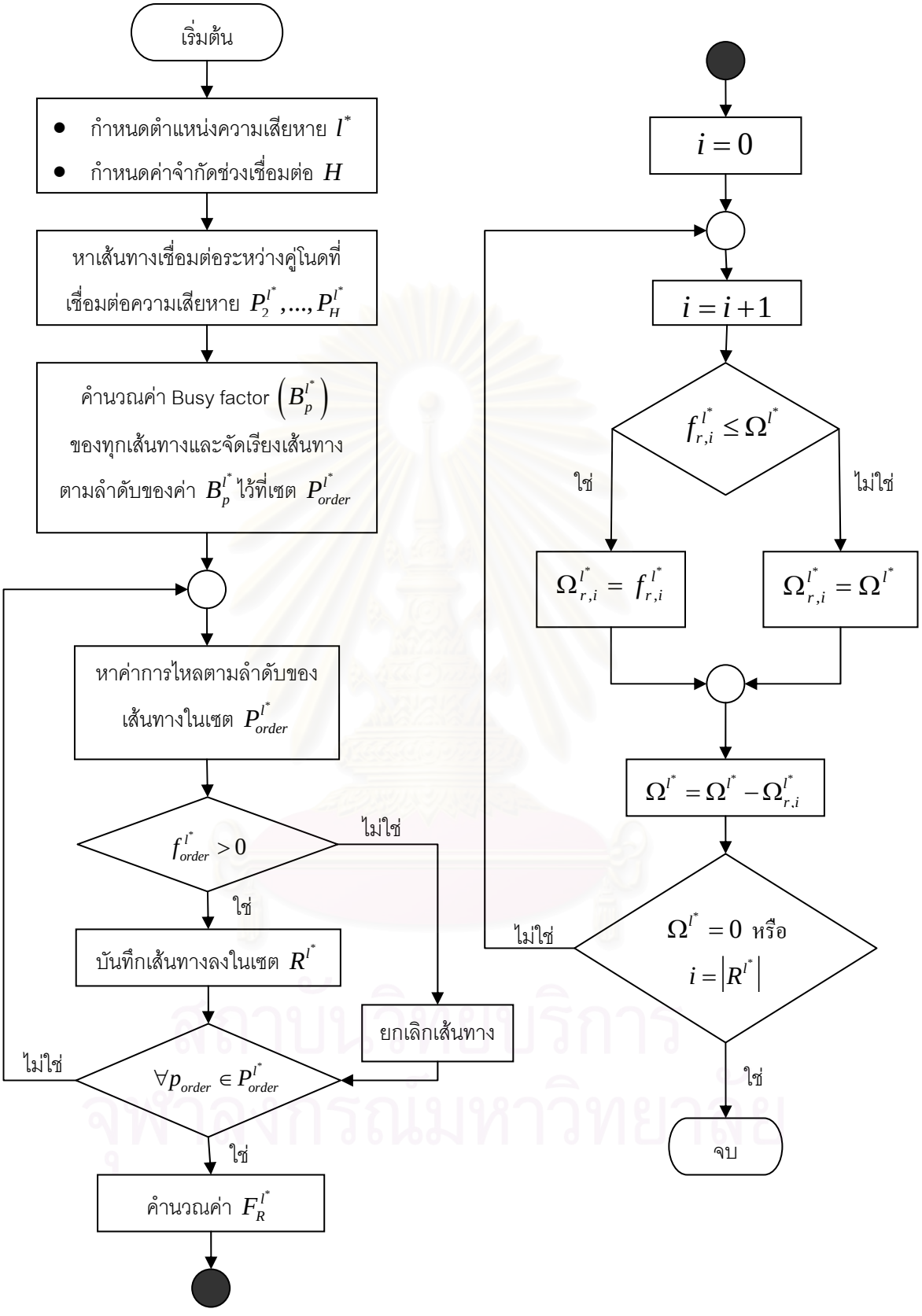
เมื่อได้ค่าการไหลที่มากที่สุดของทุกเส้นทางบูรณะแล้ว จึงกำหนดค่าของทราฟฟิกตามลำดับของเส้นทางในเซต R^{l^*} ก่อนที่จะจองความจุสำรองในเส้นทางบูรณะดังนี้

สำหรับเส้นทางบูรณะ r_i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $\left|R^{l^*}\right|$

- ถ้า $f_{r,i}^{l^*} \le \Omega^{l^*}$ จะได้ $\Omega_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*}$
  - ทำการปรับเปลี่ยนค่าทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ภายหลังจากกำหนดทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i
    - $\Omega^{l^*} = \Omega^{l^*} - \Omega_{r,i}^{l^*}$
- ถ้า $f_{r,i}^{l^*} > \Omega^{l^*}$ จะได้ $\Omega_{r,i}^{l^*} = \Omega^{l^*}$
  - ทำการปรับเปลี่ยนค่าทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ภายหลังจากกำหนดทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i
    - $\Omega^{l^*} = \Omega^{l^*} - \Omega_{r,i}^{l^*}$
- ตรวจสอบทราฟฟิกที่ยังไม่ได้รับการบูรณะ
  - ถ้า $\Omega^{l^*} = 0$ จบการทำงาน
  - ถ้า $\Omega^{l^*} \neq 0$ จองความจุสำรองในเส้นทางถัดไป

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นถ้าปริมาณค่าการไหลที่มากที่สุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} \geq \Omega^{l^*}\right)$ จะได้อัตราการบูรณะร้อยละ 100 โดยส่วนกำหนดทราฟฟิกของวิธี LWR ที่กล่าวมาข้างต้นต้องวนรอบคำนวณเพื่อกำหนดทราฟฟิกเป็นจำนวนสูงสุด $\left|R^{l^*}\right|$ รอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังผังงานในรูปที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ส่วนสร้างเส้นทาง (ข) ส่วนกำหนดทราฟฟิก

รูปที่ 1 การทำงานของวิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของโหลด

3.2 **วิธีบูรณะแบบค่าน้ำหนักของความจุสำรอง** (Spare capacity Weight Restoration scheme: SWR)

ในกรณีที่มีปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้มีเพียงพอหรือมากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย วิธีการนี้จะกำหนดปริมาณทราฟฟิกที่เชื่อมต่อไปยังเส้นทางบูรณะให้ขึ้นอยู่กับค่าการไหลของแต่ละเส้นทาง โดยลดความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของทราฟฟิกที่จะกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางและความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางให้มากที่สุด นอกจากนั้นวิธีการ SWR ยังช่วยลดโอกาสการแย่งชิงความจุสำรองระหว่างเส้นทางบูรณะอีกด้วย โดยมีตัวแปรและพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ใช้ในสมการแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณวิธี SWR

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

3.2.1 **ส่วนสร้างเส้นทาง**

กำหนดให้เกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยง l^* ในส่วนการสร้างเส้นทางนั้นจะเริ่มจากหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่เชื่อมต่อระหว่างคู่โนดที่ต่อกับข่ายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายซึ่งมีความยาว 2 ถึง H ช่วงเชื่อมต่อแล้วบันทึกไว้ที่เซต $P_2^{l^*},...,P_H^{l^*}$ ตามลำดับ โดยอาศัยอัลกอริธึม “Modified Depth First Search” [7] ต่อไปจึงเริ่มการหาค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเส้นทาง p ($f_p^{l^*}$) ตามลำดับความยาวเส้นทางของเซต $P_h^{l^*}$ ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นโดยใช้อัลกอริธึม “MKM” [13] ดังที่แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งวิธีนี้ใช้การจัดเส้นทางที่มีความยาวเท่ากันให้เป็นโครงข่ายเป็นชั้น (Layered network) ด้วยวิธีการข้างต้นจึงส่งผลให้เส้นทางที่สั้นกว่าจะมีโอกาสในการใช้ความจุสำรองก่อน ความจุสำรองที่เหลือจึงจะเป็นโอกาสใช้งานของเส้นทางที่มีความยาวมากกว่า จากนั้นจึงทำการบันทึกเส้นทางที่สามารถหาค่าการไหลได้ ($f_p^{l^*} > 0$) เป็นเซตของเส้นทางบูรณะ (R^{l^*}) ซึ่งการไหลที่หาได้จากอัลกอริธึมนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่น้อยที่สุดของปริมาณความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ในข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ในเส้นทางบูรณะเดียวกัน ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะทำงานคล้ายกับวิธี LWR จะแตกต่างก็เพียงว่าการหาค่าการไหลนั้นหาจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน ดังนั้นผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ของเซตของเส้นทางบูรณะสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธี LWRดังสมการ (3)

ลำดับถัดไปเราจะหาค่าน้ำหนักและความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบูรณะซึ่งใช้ค่าน้ำหนักในการคำนวณ เพื่อเตรียมการไว้สำหรับการกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามปริมาณการไหลที่เป็นไปได้ โดยสามารถหาค่าน้ำหนักของเส้นทางได้ดังสมการ (4) และความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบูรณะนี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าน้ำหนักของเส้นทางบูรณะที่พิจารณาและผลรวมค่าน้ำหนักของเส้นทางบูรณะทั้งหมดในชุดที่พิจารณาตามสมการ (5)

$$w_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*} \tag{4}$$

$$\Pr_{r,i}^{l^*} = \frac{w_{r,i}^{l^*}}{\sum_{i=1}^{k} w_{r,i}^{l^*}} \tag{5}$$

ส่วนเงื่อนไขบังคับคือปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายสามารถบูรณะได้ทั้งหมดและสามารถเชื่อมต่อไปยังเส้นทางบูรณะได้ไม่เกินค่าการไหลที่มากที่สุดของแต่ละเส้นทาง นั่นคือปริมาณการไหลที่คำนวณได้จากสมการ (3) มีค่ามากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} > \Omega^{l^*}\right)$ ดังแสดงในสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

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

$$\Omega_{r,i}^{l^*} \le f_{r,i}^{l^*} \tag{7}$$

3.2.2 ส่วนกำหนดทราฟฟิก

ในส่วนการกำหนดทราฟฟิกนี้จะขอแนะนำถึงวิธีการกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังเส้นทางต่างๆ ตามปริมาณการไหลที่เป็นไปได้ โดยอาศัยการคำนวณค่า Square Euclidean distance (D^{l^*}) ซึ่งแสดงถึงผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัดส่วนของการกำหนดทราฟฟิกและค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางบูรณะดังแสดงในสมการ (8) จุดประสงค์ของวิธีการนี้คือการทำให้ค่า Square Euclidean distance มีค่าน้อยที่สุดเพื่อทำให้การกำหนดทราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางมากที่สุด

$$D^{l^*} = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\Omega_{r,i}^{l^*}}{\Omega^{l^*}} - \Pr_{r,i}^{l^*} \right)^2 \tag{8}$$

จากสมการ (8) จะเห็นได้ว่าวิธีการกำหนดสัดส่วนทราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะทั้งหมด k เส้นทางนั้นมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ และต้องทำการคำนวณวิธีการที่เป็นไปได้ออกมาทุก

รูปแบบเพื่อเลือกรูปแบบที่ทำให้ค่า Square Euclidean distance มีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้การคำนวณซับซ้อนยิ่งขึ้น จึงได้นำวิธีการแก้ปัญหาที่เรียกว่าวิธีวนซ้ำ (Iterative) นำเสนอโดย A. Giorgetti, L. Valcarenghi และ P. Casoldi [18] มาใช้ในการปรับปรุงวิธีกำหนดสัดส่วนทราฟฟิกที่เหมาะสม ซึ่งวิธีวนซ้ำได้กำหนดให้จำนวนรอบที่ต้องทำการคำนวณมีค่าเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $N = \Omega^{l^*}$ เมื่อพิจารณารอบการคำนวณที่ n ทราฟฟิก 1 ช่องสัญญาณจะถูกกำหนดไปยังเส้นทางบูรณะ จากนั้นจึงเลือกเส้นทางที่มีค่า D^{n,l^*} ที่น้อยที่สุดสำหรับรอบการคำนวณนั้นเพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป ดังนั้นการคำนวณค่า Square Euclidean distance ที่น้อยที่สุดจะเป็นไปตามสมการ (9)

ตารางที่ 4 ความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ในสมการ (9) ถึง (12)

$\mathbf{N} = \{1,...,n,...N\}$	จำนวนรอบที่ต้องทำทั้งหมด
n	รอบของการคำนวณ
$\Omega_{r,i}^{n-1,l^*}$	สัดส่วนทราฟฟิกที่กำหนดไปยังเส้นทางบูรณะที่ i ตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ $n-1$
δ_j	ตัวแปรไบนารี (Binary Variable)มีค่าเป็น 1 เมื่อ $i = j$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ j เป็นค่าอื่นๆ
j	รูปแบบการกำหนดทราฟฟิกสำหรับรอบการคำนวณที่ n
$D_{i,j}^{n,l^*}$	ค่าผลต่างกำลังสองของการกำหนดทราฟฟิกไปยังเส้นทางที่ i รูปแบบการกำหนดทราฟฟิกที่ j สำหรับรอบการคำนวณที่ n
D^{n,l^*}	Square Euclidean Distance สำหรับรอบการคำนวณที่ n

$$D^{n,l^*} = \min_{j\in\{1,...,k\}} \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\Omega_{r,i}^{n-1,l^*} + \delta_j}{n} - \Pr_{r,i}^{l^*} \right)^2 \tag{9}$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & ;i = j \\ 0 & ;otherwise \end{cases} \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{k} \Omega_{r,i}^{n,l^*} = n \tag{11}$$

$$\Omega_{r,i}^{N,l^*} \le f_{r,i}^{l^*} \tag{12}$$

โดยสมการ (10) แสดงถึงเงื่อนไขของค่า δ_j ส่วน $\Omega_{r,i}^{n-1,l^*}$ นั้นคือสัดส่วนทราฟฟิกที่กำหนดไปยังเส้นทางบูรณะที่ i ตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ $n-1$ ซึ่งได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้า ดังนั้นเงื่อนไขบังคับในสมการ (6) และ (7) สามารถแก้ไขใหม่ได้ดังสมการ (11) และ

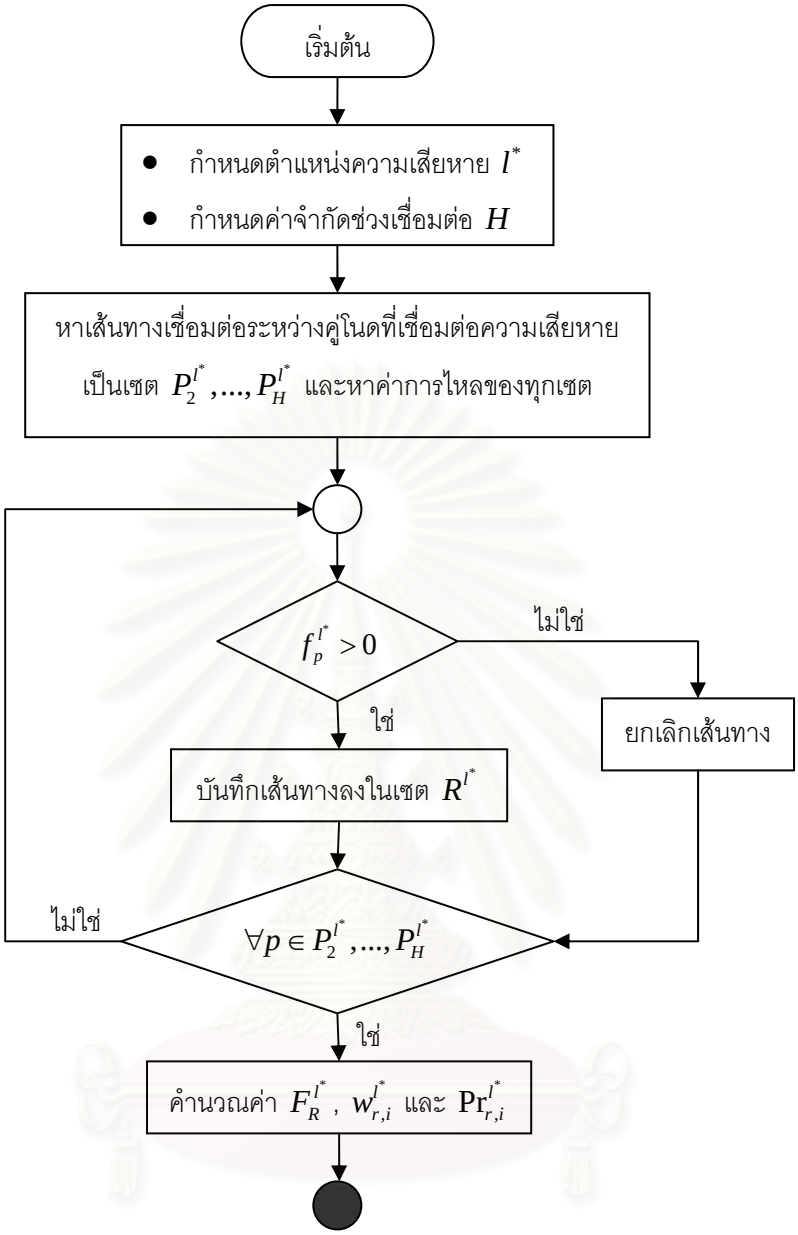
(12) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของทั้งสมการ (8) และสมการ (9) ซึ่งสามารถวัดได้จากจำนวนพจน์ของค่า D^{l^*} ที่คำนวณได้จากการกำหนดความจุที่เสียหายลงบนเส้นทางการบูรณะ โดยหากใช้สมการ (8) ต้องคำนวณ $\begin{pmatrix} \Omega^{l^*}+k-1 \\ k-1 \end{pmatrix}$ ครั้ง ส่วนวิธีวนซ้ำในสมการ (9) ต้องคำนวณ $k \times \Omega^{l^*}$ ครั้ง ซึ่งจะเห็นว่าต้องคำนวณน้อยครั้งกว่าและง่ายกว่าวิธีแรก

ในกรณีที่ไม่สามารถบูรณะปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายได้ทั้งหมดเงื่อนไขบังคับในสมการ (6) และ (7) จะไม่เป็นจริง เนื่องจากปริมาณการไหลที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} \le \Omega^{l^*}\right)$ ดังนั้นต้องปรับเปลี่ยนเงื่อนไขบังคับในสมการดังกล่าว และไม่ต้องคำนวณสัดส่วน ทราฟฟิกในสมการ (9) และจะได้ปริมาณทราฟฟิกที่จะต้องกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางบูรณะดังแสดงในสมการ (3.13) และ (14) ตามลำดับ และการทำงานของขั้นตอนบูรณะสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 2 และ 3

$$\sum_{i=1}^{k} \Omega_{r,i}^{l^*} = F_R^{l^*} \tag{13}$$

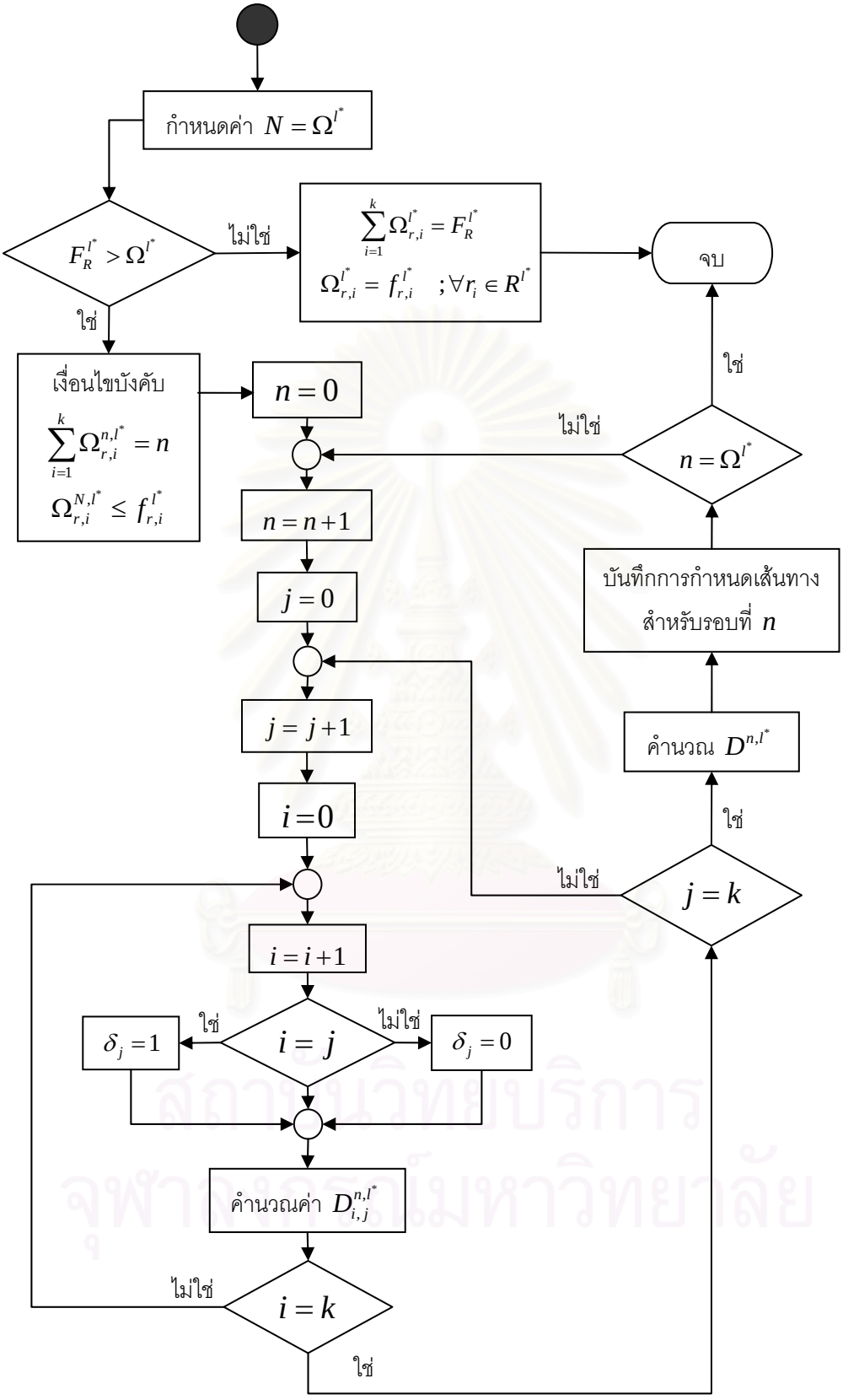
$$\Omega_{r,i}^{l^*} = f_{r,i}^{l^*} \quad ;\forall r_i \in R^{l^*} \tag{14}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนสร้างเส้นทาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3 การทำงานของวิธีบูรณะแบบ SWR ส่วนกำหนดทราฟฟิก

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

วิธีการบูรณะแบบผสมหรือ LSWR ที่นำเสนอนี้เกิดจากแนวความคิดของการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการบูรณะทั้งสองวิธีข้างต้น วิธี LWR สามารถทำให้โหลดหรือทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปใช้เส้นทางที่มีค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงต่ำ แม้จะเป็นกรณีที่ผลรวมค่าการไหลที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} \le \Omega^{l^*}\right)$ แต่ในกรณีที่มีความจุสำรองที่สามารถใช้งานได้ในแต่ละเส้นทางบูรณะเหลือเพียงพอหรือมีค่ามากกว่าปริมาณทราฟฟิกดังกล่าว $\left(F_R^{l^*} > \Omega^{l^*}\right)$ วิธีการนี้จะไม่สามารถกำหนด ทราฟฟิกให้เหมาะกับสัดส่วนค่าการไหลของแต่ละเส้นทางได้ ส่วนวิธี SWR จะมีปัญหาต่างจากวิธี LWR คือสามารถกระจายทราฟฟิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผลรวมค่าการไหลที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} \le \Omega^{l^*}\right)$ เท่านั้น ดังนั้นการนำข้อดีของทั้งสองวิธีมารวมกันก็น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีบูรณะให้สามารถบรรลุเป้าหมายของทั้งสองวิธีข้างต้นได้พร้อมกัน

3.3.1 ส่วนสร้างเส้นทาง

ในส่วนสร้างเส้นทางของวิธี LSWR จะทำงานเหมือนกับส่วนสร้างเส้นทางของวิธี LWR เพียงแต่ว่าหลังจากการคำนวณผลรวมค่าการไหลที่เป็นไปได้ $\left(F_R^{l^*}\right)$ ในสมการ (3.3) แล้วให้นำค่าการไหลของแต่ละเส้นทางบูรณะ $\left(f_{r,i}^{l^*}\right)$ มาใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักของเส้นทาง $\left(w_{r,i}^{l^*}\right)$ และความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทาง $\left(\Pr_{r,i}^{l^*}\right)$ ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เส้นทางบูรณะกระจายออกไปยังข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำมากกว่าการใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดของวิธี SWR ส่วนสร้างเส้นทางของวิธีนี้ต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าการไหลทั้งหมด $\left|P_{order}^{l^*}\right|$ ครั้งเช่นเดียวกับวิธี LWR

3.3.2 ส่วนกำหนดทราฟฟิก

หลังจากการสร้างเส้นทางในส่วนแรกแล้วจึงทำการกำหนดทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบไปยังเส้นทางบูรณะด้วยวิธีการเดียวกับการกำหนดทราฟฟิกของวิธี SWR แต่จะเกิดการใช้ความจุสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานต่ำ เนื่องจากการสร้างเส้นทางในขั้นแรกเราเราเลือกใช้เส้นทางจากการเรียงลำดับค่า Busy factor จากน้อยไปหามาก หากผลรวมค่าการไหลที่หาได้ในส่วนสร้างเส้นทางมีค่ามากกว่าปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย $\left(F_R^{l^*} > \Omega^{l^*}\right)$ วิธีการนี้ก็จะสามารถกำหนดสัดส่วนทราฟฟิกไปยังเส้นทางบูรณะตามปริมาณค่าการไหลที่หาได้

โดยต้องคำนวณตามวิธีวนซ้ำเป็นจำนวน $k \times \Omega^{l^*}$ ครั้ง แต่ถ้าผลรวมค่าการไหลที่หาได้มีค่าน้อยกว่าปริมาณทราฟฟิกเหล่านั้น $\left(F_R^{l^*} \le \Omega^{l^*}\right)$ ก็จำเป็นจะต้องใช้ความจุสำรองของทุกเส้นทางให้เต็มที่ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ (13) และ (14)

3.4 **ค่าการกระจายโหลด** (Load Distribution Factor: *LDF*)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการนิยามค่าการกระจายโหลดจากค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงเมื่อพิจารณากรณีที่ข่ายเชื่อมโยง l^* ใดๆ ได้รับความเสียหายโดยมีตัวแปรที่ใช้ประกอบการพิจารณาดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 5 ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการ (15) ถึง (21)

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

ในกรณีที่ความเสียหายยังไม่เกิดขึ้น ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนที่แสดงถึงปริมาณความจุของข่ายเชื่อมที่ถูกใช้งานโดยเส้นทางใช้งาน (Working path) เทียบกับความจุทั้งหมดในข่ายเชื่อมโยง แต่ภายหลังการเกิดความเสียหายจะหาค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของความจุที่ถูกใช้งานเทียบกับความจุที่มีในข่ายเชื่อมโยงได้ดังสมการ (15) ส่วนความจุสำรองของแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้ไป จะสามารถหาค่าใช้งานความจุสำรอง (Spare resource utilization) ของข่ายเชื่อมโยง ได้ดังสมการ (16) และค่าใช้งานความจุสำรองของโครงข่ายได้ดังสมการ (17) สมการ (18) แสดงถึงความจุสำรองที่ถูกใช้ในข่ายเชื่อมโยงโดยทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย

$$U_l^{l^*} = \frac{\rho_l^r}{wc_l + sc_l} \tag{15}$$

$$U_{sc,l}^{l^*} = \frac{\rho_{sc,l}^{l^*}}{sc_l} \tag{16}$$

$$\rho_{sc,l}^{l^*} = \sum_{i=1}^{k} \gamma_{i,l}^{l^*} \Omega_i^{l^*} \tag{17}$$

$$U_{sc,net}^{l^*} = \frac{\sum_{\forall l \in |E|} \rho_{sc,l}^{l^*}}{\sum_{\forall l \in |E|} sc_l} \quad (18)$$

ภายหลังจากการบูรณะค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงจะมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับก่อนเกิดความเสียหายหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าข่ายเชื่อมโยงที่เราพิจารณาถูกใช้เป็นเส้นทางการบูรณะหรือไม่ และการที่จะบอกถึงการกระจายโหลดเราสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของค่าใช้งานของทุกข่ายเชื่อมโยงภายหลังการบูรณะโดยอาศัยสมการทางสถิติ ในการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เข้ามาช่วยในการประเมินและนิยามการกระจายของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงดังสมการ (19)

$$S^{l^*} = \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (U_l^{l^*} - \bar{U}^{l^*})^2}{|E|}} \quad (19)$$

ซึ่งในการพิจารณานี้ค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยง l^* มีค่าเป็น 0 เนื่องจากเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหาย ทราฟฟิกที่อยู่ในข่ายเชื่อมโยงนี้จะถูกย้ายไปอยู่ในข่ายเชื่อมโยงอื่นทั้งหมด โดยค่า $\bar{U}^{l^*}$ ที่แสดงในสมการ (19) เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (20)

$$\bar{U}^{l^*} = \frac{\sum_{l \in E} U_l^{l^*}}{|E|} \quad (20)$$

ค่าที่ได้จากสมการ (19) นั้นไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบค่าระหว่างโครงข่ายได้โดยตรง ถ้าหากว่าโครงข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงไม่เท่ากัน จึงแก้ปัญหาด้วยการทำให้เป็นมาตรฐาน (Normalize) ด้วยการนำค่า $\bar{U}^{l^*}$ ในสมการ (20) มาเป็นตัวหารและได้นิยามค่าการกระจายโหลดเพิ่มเติมจากสมการ (19) ได้ใหม่ดังแสดงในสมการ (21)

$$LDF^{l^*} = \frac{1}{\bar{U}^{l^*}} \sqrt{\frac{\sum_{l \in E} (U_l^{l^*} - \bar{U}^{l^*})^2}{|E|}} \quad (21)$$

ซึ่งค่าการกระจายโหลดที่ได้จากสมการ (21) นี้สามารถเปรียบเทียบทั้งภายในโครงข่ายเดียวกันและระหว่างโครงข่ายได้ สำหรับกรณีที่มีค่าการกระจายโหลดต่ำกว่าแสดงว่าการกระจายปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายไปยังข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ของกระบวนการบูรณะที่เลือกใช้ในโครงข่ายมีประสิทธิภาพดีกว่ากรณีที่มีค่าการกระจายโหลดสูงกว่า หรือสามารถ

มองได้ว่าค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงสำหรับกรณีแรกมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าใช้งานของข่ายเชื่อมโยงของทั้งโครงข่ายมากกว่า

3.5 สรุปสิ่งที่นำเสนอ

งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอแนวทางวิธีแก้ไขปัญหาการกระจายโหลด โดยเริ่มจากการปรับปรุงการกระจายโหลดหรือทราฟฟิกของการบูรณะให้ดีขึ้นจึงได้เสนอวิธีบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยง โดยแบ่งการพัฒนาออกเป็นสามวิธี วิธีแรก LWR พิจารณาให้เส้นทางที่มีค่าใช้งานหรือ Busy factor ต่ำที่สุดมีโอกาสในการหาค่าการไหลก่อนเพื่อเป็นทางเลือกให้เกิดการใช้งานข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าใช้งานก่อนเกิดความเสียหายต่ำ วิธีที่สอง SWR จะพิจารณาค่าการไหลจากเส้นทางที่สั้นที่สุดก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีแก้ปัญหาแบบวนซ้ำ (Iterative) ในการหาค่า Square Euclidean Distance เพื่อกำหนดสัดส่วนของทราฟฟิกดังกล่าวไปยังเส้นทางบูรณะตามปริมาณของค่าการไหลในแต่ละเส้นทาง วิธีที่สาม LSWR เป็นการนำข้อดีของทั้งสองวิธีมาใช้โดยพิจารณาทั้งค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงก่อนเกิดความเสียหายและสัดส่วนของทราฟฟิกที่จะกำหนดไปยังแต่ละเส้นทางบูรณะ เพื่อให้วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนสุดท้ายได้ยกตัวอย่างการคำนวณเบื้องต้นเพื่อแสดงการเลือกเส้นทางและข้อดีของการใช้วิธีแบบวนซ้ำ จากนั้นจึงได้นิยามค่าใช้งานแบบต่างๆเพื่อปรับให้เข้ากับสถานการณ์ของการจำลอง และนำค่าใช้งานข่ายเชื่อมโยงภายหลังจากการบูรณะความเสียหายมาใช้ในการนิยามค่าการกระจายโหลดที่ได้นำเสนอ เพื่อใช้ประเมินค่าการกระจายของทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายจากการใช้วิธีบูรณะระดับข่ายเชื่อมโยงแบบใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอ

ผลิตผลและหรือความสัมฤทธิผลของงานที่ได้ดำเนินการไปแล้ว

1. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต

1.นายธีระวัฒน์ ไกรฤกษ์: การบูรณะโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายโดยใช้ค่าปัจจัยการกระจายโหลดเป็นดัชนีชี้วัดสำหรับค่าสมรรถนะความอยู่รอดของโครงข่าย (Network Restoration Utilizing Load Distribution Factor as Survivability performance indea)

2. นายโกวิทย์ สิทธิ: การจัดสรรเส้นทางที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาถึงการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในโครงข่ายแอดฮอก (Energy Efficient Routing Mechanism with MAC Protocol consideration in Hoc Network)

รายการอ้างอิง

[1] A. Zolfaghari, and F.J. Kaudel. Framework for Network Survivability Performance. IEEE Journal. vol.12 (January 1994): 46-51.

[2] W. D. Grover. Mesh-Based Survivable Networks Option and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking. Prentice Hall PTR, 2003.

[3] Y. Liu, and K. S. Trivedi. A General Framework for Network Survivability Quantification. 12th GI/ITG Conference on Measuring, Modeling and Evaluation of Computer and Communication Systems. (2003)

[4] T1A1.2 Working Group on Network Survivability Performance. Technical report on Performance and Signal processing. Technical report. (November 2000)

[5] D. Zhou, and S. Subramaniam. Survivability in Optical Networks. IEEE Network. (November/December 2000): 16-23.

[6] Y. Xiong, and L. Mason. Restoration strategies and Spare Capacity Requirements in Self-Healing ATM Network. IEEE proc. INFOCOM'97. (April 1997): 353-360.

[7] M. Patel, R. Chandrasekaran, and S. Venkatesan. A comparative study of restoration schemes and spare capacity assignments in mesh networks. Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Computer Communications and Networks. (October 2003)

[8] J. Doucette, and W.D. Grover. Comparision of Mesh Protection and Restoration Schemes and the Dependency on Graph Connectivity. 3rd International Workshop on Design of Reliable Communication Networks. (October 2001): 121-128.

[9] D. Jungnickel. Graphs, Networks and Algorithms (algorithms and Computation in Mathematics). 171-186. Springer.

[10] C. Saivichit, J.A. Barria, and L.F. Turner. Topological Clusterisation for Fault Management in Large Telecommunication Networks. IEEE 2003. (2003): 1047-1051.

[11] A. Giorgetti, L. Valcarenghi, and P. Casoldi. Single-Layer Versus Multilayer Preplanned Lightpath Restoration. IEEE Journal of lightwave technology. Vol. 23 no. 10 (October 2005)

[12] L. Valcarenghi, and A. Giorgetti. Implement Stochastic Preplanned Restoration with Proportional Weighted Path Choice in IP/GMPLS/WDM Networks. Photonic Network Communications. (2002): 285-295.

[13] R. Shenai, C. Maiciocco, M. Mishra and K. Sivalingam. Threshold based Selective Link Restoration for Optical WDM Mesh Network. IEEE Design of Reliable Communication Networks (DRCN) 2003, Banff, Alberta, Canada. (October 2003): 31-38.

[14] R. Shenai, and K. Sivalingam. Hybrid Survivability Approaches for Optical WDM Mesh Network. IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol.23 no. 10 (October 2005): 3046-3055.

[15] C. Saivichit. Network Reconfiguration Algorithm for Overcoming Faults arising in Networks. Ph.D. thesis University of London. (May 2001)

[16] M. Herzberg, S.J. Bye, and A. Utano. Hop-limit approach for spare-capacity assignment in survivable networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. Vol. 3 no. 6 (December 1995): 775-784.

[17] H. Sakauchi, Y. Nishimura, and S. Hasegawa. A Self-healing Network with an Economical Spare-channel Assignment. IEEE GLOBECOM '90. Vol. 1 (December 1990): 438-443.

[18] H. Saito, Y. Miyao, T. Komine, and F. Kubota. Joint capacity assignment to state independent working and spare paths for enhanced network survivability. IEEE conf. Communication. (June 1998): 1743-1748.

[19] C. –C. Shyur, T. –C. Lu, and U. –P. Wen. Applying Tabu Search to Spare Capacity Planning for Network Restoration. Computers & Operations Research. (October 1999): 1175-1194..

[20] F. Yegenoglu, and E. Sherk. Network Characterization Using Constraint-Based Definitions of Capacity, Utilization, and Efficiency. IEEE Communication Magazine. (September 2005): 132-138.

[21] K. Murakami, and H.S. Kim. Optimal Capacity and Flow Assignment for Self-Healing ATM Network Based on Line and End-to-End Restoration. IEEE/ACM Trans on Networking. (April 1998): 207-221

[22] L. Ruan, H. Luo, and C. Liu. Dynamic Routing Algorithm with Load Balancing Heuristics for Restorable Connections in WDM Networks. IEEE Journal on selected areas in communications. Vol. 22 no.9 (November 2004)

[23] K. Gopalan, T. Chiueh, and Y. J. Lin. Load balancing Routing with Banwidth-Delay Guarantees. IEEE Comunication Magazine. (June 2004): 108-113.

[24] H. Lee, S.B. Kim, and Y. Go. Modeling and algorithms for physical layer network survivability. IEEE 1995 (1995): 161-166.

[25] A.Z. Fahad, P.A. Jayasumana, and A.H. Jahangir. Network Survivability performance evaluation with applications in WDM networks with wavelength conversion. Proceedings – Conference on Local Computer Networks, LCN, Proceedings – 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004. (2004): 344-351.