

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมเพื่อคำนวณค่าคาดหวังของความจุที่พึงได้ในโครงข่ายแกนกลาง
หลายชั้นที่มีความเสียหายแบบเฟ้นสุ่ม

นายปิยะนันท์ สัตยภิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF GAME THEORY FOR COMPUTATION OF EXPECTED
ACHIEVABLE CAPACITY IN MULTI-LAYER CORE NETWORK WITH
STOCHASTIC FAILURE

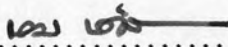
Mr. Piyanan Satayapiwat

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 2007
Copyright of Chulalongkorn University


501455

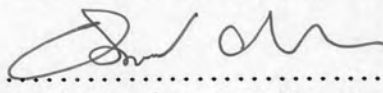
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมเพื่อคำนวณค่าคาดหวังของความจุที่พึงได้
ในโครงข่ายแกนกลางหลายชั้นที่มีความเสียหายแบบเฟ้นสุ่ม
โดย นายปิยะนันท์ สัตยภิวัฒน์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวนดิศ อัครกุล

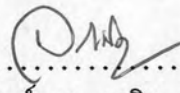
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศธีรธัญวงศ์)

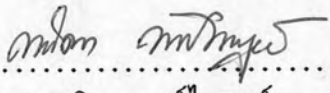
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวนดิศ อัครกุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วาทีต เบญจพลกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)


..... กรรมการ
(ดร.พนิตา พงษ์ไพบูลย์)

ปิยะนันท์ สัตยภิวัฒน์ : การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมเพื่อคำนวณค่าคาดหวังของความจุที่
พึงได้ในโครงข่ายแกนกลางหลายชั้นที่มีความเสียหายแบบเฟ้นสุ่ม (APPLICATION OF
GAME THEORY FOR COMPUTATION OF EXPECTED ACHIEVABLE CA-
PACITY IN MULTI-LAYER CORE NETWORK WITH STOCHASTIC FAIL-
URE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เชาว์นิตศ อัฐวกุล, 95 หน้า.

ในการออกแบบระบบโครงข่ายให้มีความทนทานต่อความเสียหายสูง ผู้ออกแบบระบบ
จำเป็นต้องมีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการระบุจุดที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของระบบ
โครงข่าย ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบระบบโครงข่ายให้มีคุณภาพสูง ทั้งนี้การ
วิเคราะห์ถึงรูปแบบความเสียหายที่เป็นไปได้ทั้งหมดควรจะถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์
ด้วย ในอดีตได้มีการใช้ทฤษฎีเกมเพื่อจำลองเกมการส่งข้อมูลระหว่างผู้เล่นเรเตอร์และผู้
ทำลาย เพื่อทำการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายบนพื้นฐานของการเกิดความ
เสียหายอย่างร้ายแรงที่สุด วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีเกมในการวิเคราะห์ความเชื่อถือ
ได้ของระบบโครงข่ายหลายชั้นที่มีความเสียหายแบบเฟ้นสุ่ม ซึ่งมีหลายคู่โหนดความต้องการ
ข้อมูล โดยนำเสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่าย เมื่อระบบ
โครงข่ายเกิดความเสียหายจากการจ้องทำลายจากผู้ไม่ประสงค์ดีกับระบบ พร้อมทั้งนำเสนอ
ดัชนีตัวชี้บอกใหม่ (expected achievable capacity, EAC) ซึ่งใช้ชี้วัดถึงความเชื่อถือได้
ของระบบโครงข่าย เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ระดับความอ่อนไหวของอุปกรณ์ระบบโครงข่ายด้วย
กระบวนการชี้บอกถึงข่ายเชื่อมโยงหรือโหนดที่สำคัญ และต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อน
นอกจากนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแบบจำลองสำหรับการคำนวณหาค่า EAC ในกรณีที่ระบบ
โครงข่ายมีความต้องการข้อมูลเพียงคู่โหนดเดียวและหลายคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธี MSA และ
กำหนดการเชิงเส้น เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาขีดสูงสุดของชั้นต่ำ ซึ่งเป็นปัญหาของเกมระบบ
โครงข่าย ระเบียบวิธีการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อระบบโครงข่ายที่นำเสนอ
ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบกับทั้งระบบโครงข่ายทดสอบสมมติและระบบโครงข่ายที่มีใช้งานจริงใน
ทางปฏิบัติ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า เราสามารถนำระเบียบวิธีการชี้วัดจุดที่ต้องทำการปรับปรุงก่อน
และแบบจำลองการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่าย มาใช้ช่วยในการออกแบบระบบ
โครงข่ายให้มีความคงทนต่อความเสียหายสูง กับระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานทั่วไปได้จริง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....ปิยะนันท์ สัตยภิวัฒน์.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2550

4970438721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: GAME THEORY / MULTI-LAYER NETWORK / STOCHASTIC FAILURE / EXPECTED ACHIEVABLE CAPACITY.

PIYANAN SATAYAPIWAT : APPLICATION OF GAME THEORY FOR COMPUTATION OF EXPECTED ACHIEVABLE CAPACITY IN MULTI-LAYER CORE NETWORK WITH STOCHASTIC FAILURE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAODIT ASWAKUL, Ph.D., 95 pp.

To obtain a network with high fault tolerance, network engineers require an efficient method to identify and then upgrade vulnerable network components. Also, all possible characteristics of failure event must be captured in the analysis. A network game model between an intelligent router and attacker has been widely explored to overcome this challenge. Based on game theory framework, this thesis has proposed a new vulnerability identification method to measure network reliability of multicommodity stochastic network when the network is attacked by an intelligent adversary, who destroys network links or nodes to minimize capacity achieved between terminals. In addition, a new performance indicator (expected achievable capacity, EAC) has been proposed to help quantifying link or node vulnerability level. To obtain EAC, a maximin problem has been formulated and solved by the method of successive average and linear programming. Reported numerical results on various types of networks with multiple OD demands show that the effect of network vulnerability can be thoroughly analyzed by the proposed EAC and hence this suggests the usefulness of the proposed network vulnerability analysis framework.

Department	Electrical Engineering	Student's signature	<i>Piyanan Satayapiwat</i>
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature	<i>E. Aswakul</i>
Academic year	2007		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ. ดร.เชาวน์ดิศ อัสวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมถึงคำวิจารณ์ในทางสร้างสรรค์ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดี ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญเทคโนโลยีระบบโทรคมนาคม (center of excellence in telecommunication system) สถานที่ทำงานวิจัย รวมทั้งเพื่อนพี่น้องนักวิจัยทุกคน ขอขอบคุณน้องตัน น้องฟูก และทีมงาน NGN² ทุกคนสำหรับหยาดเหงื่อและแรงงาน รวมถึงความทุ่มเทให้กับโครงการ NGN² จนสามารถปิดโครงการไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเป็นพิเศษกับ คุณภัทรชาติ โกมลภิติ ที่ช่วยให้คำแนะนำและสอนความรู้ที่มีคุณค่าให้กับข้าพเจ้า และคุณกสิกา สุขสมบูรณ์ ที่เป็นหัวหน้าที่น่ารักและให้คำแนะนำที่ดี ๆ กับข้าพเจ้าเรื่อยมา

ขอขอบคุณพี่น้องสมาคมฟุตบอลทั้งสนามปูน สนามหญ้า และ สนามคอมพิวเตอร์ ที่ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถได้พักผ่อนและออกกำลังกายยามท้อแท้ จนทำให้การวิจัยประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณเป็นพิเศษกับพี่ยอดและพี่ไอ้ สำหรับประสบการณ์ดี ๆ ที่มีในสนามฟุตบอลและการเอื้ออำนวยสถานที่ที่ใช้แข่งขันเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมถึงคนรักและพี่น้องของข้าพเจ้าที่คอยห่วงใยและคอยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	6
1.4 การชี้วัดผลการทดสอบ	6
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน	10
2.1 ทฤษฎีเกม	10
2.1.1 เกมการแข่งขันสองคน โดยผลรวมเป็นศูนย์	11
2.1.2 ทฤษฎีขีดต่ำสุดของขั้นสูง	13
2.2 ทฤษฎีการไหลสูงสุด	16
2.3 การส่งข้อมูลหลายวิถี	17
2.3.1 การกระจายข้อมูล	17
2.3.2 การส่งข้อมูลแบบเฟ้นสุ่ม	17
2.4 กำหนดการเชิงเส้น	18
2.5 ระบบโครงข่ายหลายชั้น	19
3 แบบจำลองของเกมและค่าของเกม	21
3.1 เกมของโครงข่าย	21
3.2 สัญลักษณ์พื้นฐาน	21
3.3 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการส่งข้อมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของข่ายเชื่อมโยงที่เสนอ	22
4 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดเดียว	25
4.1 การวิเคราะห์และแก้ปัญหาโดยกรรมวิธี MSA	25
4.2 ปัญหาของผลการวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในอดีต	27
4.3 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่เสนอ	29

บทที่

4.4 การเปรียบเทียบ กระบวนการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่าย	29
4.5 การคำนวณหาค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายหลายชั้น	30
4.6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายสำหรับรูปแบบความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงแบบต่าง ๆ	32
4.7 การวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบสำหรับกรณีระบบโครงข่ายแบบต่าง ๆ	37
4.7.1 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	37
4.7.2 ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	40
4.7.3 ระบบโครงข่ายแกน Abilene	43
4.7.4 ระบบโครงข่ายแกน APAN	46
4.8 การวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการเสียหายของโหนด	49
5 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดมากกว่า 1 คู่โหนด	51
5.1 แบบจำลองการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อความจุของระบบมากที่สุดเมื่อมีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดมากกว่า 1 คู่โหนด	51
5.2 การวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อความจุที่พึงได้ในการส่งข้อมูลบนโครงข่ายแบบต่าง ๆ	54
5.2.1 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด	54
5.2.2 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	56
5.2.3 ระบบโครงข่ายแกน Abilene	58
5.2.4 ระบบโครงข่ายแกน APAN	60
5.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN	62
5.3.1 การวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN ที่ใช้การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาจำนวนช่วงการเชื่อมต่อ	62
5.3.2 การวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น APAN ที่ใช้การเลือกเส้นทางโดยพิจารณาจากขนาดความจุ	66
5.3.3 การเปรียบเทียบค่า EAC ที่ได้ระหว่างวิธีการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ในระบบโครงข่าย APAN	69
5.4 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความซับซ้อนของวิธีที่เสนอ	71
5.4.1 ผลของจำนวนรอบของการเล่นเกมต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ	71
5.4.2 ผลของเงื่อนไขในการหยุดเล่นเกมต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ	73
5.4.3 ผลของขนาดของระบบโครงข่ายต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ	74
5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุที่สูงที่สุดของระบบโครงข่าย	74
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	80

บทที่	
ภาคผนวก	83
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	การแปลงลักษณะความเสียหายของระบบโครงข่ายหลายชั้น	32
ตารางที่ 4.2	ค่าความจุสูงสุดของระบบโครงข่ายในกรณีการวิเคราะห์ลักษณะต่าง ๆ ของระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	34
ตารางที่ 4.3	หมายเลขของข่ายเชื่อมโยง การเชื่อมต่อ และความจุของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ในระบบโครงข่ายแกน APAN	47
ตารางที่ 5.1	ค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยงและค่า EAC ณ จุดสมดุลของ เกมจากการทดสอบ 10 ครั้ง	56
ตารางที่ 5.2	การแปลงการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะให้เป็นการเชื่อมต่อในชั้นกายภาพ สำหรับระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อเป็นค่าใช้จ่ายในการ ส่งข้อมูล	64
ตารางที่ 5.3	เส้นทางการเชื่อมต่อที่ใช้สำหรับแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลของระบบ โครงข่าย APAN เมื่อใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อเป็นค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล	65
ตารางที่ 5.4	การแปลงการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะให้เป็นการเชื่อมต่อในชั้นกายภาพ สำหรับระบบโครงข่าย APAN เมื่อใช้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอ ขวดเป็นค่าใช้จ่ายในการเลือกเส้นทางการส่งข้อมูล	67
ตารางที่ 5.5	เส้นทางการเชื่อมต่อที่ใช้สำหรับแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลของระบบ โครงข่าย APAN เมื่อใช้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวดเป็นค่าใช้จ่าย ในการส่งข้อมูล (เลือกเส้นทางที่มีความจุมากที่สุดก่อน)	67
ตารางที่ 5.6	เวลาและจำนวนรอบของการเล่นเกมที่ต้องใช้ที่ค่า θ ต่าง ๆ	73
ตารางที่ 5.7	เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายลักษณะต่าง ๆ เมื่อทำการเล่นเกมเป็นจำนวน 1000 รอบ	74

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	7
รูปที่ 1.2	ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	8
รูปที่ 1.3	ระบบโครงข่ายแกน Abilene	8
รูปที่ 1.4	ระบบโครงข่ายแกน APAN	9
รูปที่ 2.1	แผนภาพต้นไม้ของเกมแบบครอบคลุม	10
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างตารางผลรับ	12
รูปที่ 2.3	ระบบโครงข่ายและความจุของข่ายเชื่อมโยง	16
รูปที่ 2.4	ระบบโครงข่ายสองชั้น	19
รูปที่ 3.1	ระบบโครงข่ายที่มีเส้นทางเดียวและสองเส้นทางในการส่งข้อมูล	24
รูปที่ 4.1	ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย	27
รูปที่ 4.2	ผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งสองรูปแบบของค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่าย เชื่อมโยง ณ จุดสมดุลของเกม	28
รูปที่ 4.3	ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับ ระบบโครงข่ายอย่างง่าย	30
รูปที่ 4.4	ระบบโครงข่าย 3 ชั้น	31
รูปที่ 4.5	ระบบโครงข่าย 2 ชั้น	31
รูปที่ 4.6	ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	33
รูปที่ 4.7	ผลกระทบของลักษณะการเกิดความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ของระบบโครงข่าย กริด 9 โหนด (ในกรณี PCSF ผลจากความเสียหายมีลักษณะเดียวกันสำหรับ ทุกข่ายเชื่อมโยง)	33
รูปที่ 4.8	ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด	35
รูปที่ 4.9	ผลกระทบของลักษณะการเกิดความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ของระบบโครง ข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	35
รูปที่ 4.10	ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	37
รูปที่ 4.11	ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับ ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	38
รูปที่ 4.12	ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับ ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงมีความจุที่แตกต่างกัน	39
รูปที่ 4.13	โครงสร้างชั้นกายภาพของระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	40
รูปที่ 4.14	ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับ ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	41
รูปที่ 4.15	ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับ ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 มีความจุเพียง 10 หน่วย	42

รูปที่ 4.16 ผลจากการเพิ่มขนาดค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 มีความจุเพียง 10 หน่วย	42
รูปที่ 4.17 ระบบโครงข่ายแกน Abilene	44
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน Abilene	45
รูปที่ 4.19 ระบบโครงข่ายแกน APAN	46
รูปที่ 4.20 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN	48
รูปที่ 4.21 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด กรณีการพิจารณาผลจากความเสียหายของโหนด	49
รูปที่ 4.22 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	50
รูปที่ 5.1 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด	54
รูปที่ 5.2 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด	55
รูปที่ 5.3 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	57
รูปที่ 5.4 การลู่เข้าของค่า EAC ในระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	57
รูปที่ 5.5 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด	57
รูปที่ 5.6 ระบบโครงข่ายแกน Abilene	58
รูปที่ 5.7 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน Abilene	59
รูปที่ 5.8 ระบบโครงข่ายแกน Abilene และชุดของเซตตัด	59
รูปที่ 5.9 ระบบโครงข่ายแกน APAN	60
รูปที่ 5.10 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)	61
รูปที่ 5.11 การเชื่อมต่อของระบบโครงข่าย APAN ในชั้นกายภาพ	63
รูปที่ 5.12 การเชื่อมต่อของระบบโครงข่าย APAN ในชั้นตรรกะ	64
รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของค่า EAC ในกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย APAN เมื่อพิจารณาใช้จำนวนช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทาง	65
รูปที่ 5.14 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN กรณีการพิจารณาใช้ช่วงเชื่อมต่อในการเลือกเส้นทาง (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)	66
รูปที่ 5.15 การลู่เข้าของค่า EAC ในกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย APAN เมื่อพิจารณาใช้ความจุของเส้นทางในการเลือกเส้นทาง	68

รูปที่ 5.16 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN กรณีการพิจารณาใช้ความจุของเส้นทางในการเลือกเส้นทาง (การลดลงของข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ที่ไม่อยู่ในรูปไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC)	68
รูปที่ 5.17 ผลจากการเพิ่มขึ้นของค่า EAC เมื่อเพิ่มจำนวนคูโหนดในระบบโครงข่าย APAN	69
รูปที่ 5.18 ผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนคูโหนดต่อค่า EAC ที่ได้รับโดยเฉลี่ยในกรณีการใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีค่าความจุสูงที่สุด	70
รูปที่ 5.19 ผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนคูโหนดต่อค่า EAC ที่ได้รับโดยเฉลี่ยในกรณีการใช้วิธีการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนฮอปมากที่สุด	70
รูปที่ 5.20 ระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด	72
รูปที่ 5.21 เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่อจำนวนรอบของการเล่นเกมในระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด	72
รูปที่ 5.22 ระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด	75
รูปที่ 5.23 ค่า EAC ที่ได้รับเมื่อเพิ่มจำนวนคูโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลแต่ละประเภท ในระบบโครงข่ายทดสอบกริด 9 โหนด	75