ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249011

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดพื้นที่เพื่อแก้ปัญหาการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย

คณรัฐ์ ค้ำชู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2554

b00253576

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249011

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดฟัซซี่เพื่อแก้ปัญหาการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย

คณรัศมิ์ คำชู

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2554

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดฟัซซี่เพื่อแก้ปัญหาการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย

คณรัศมิ์ ค้ำชู

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ

.....กรรมการ
รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์

.....กรรมการ
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล

.....กรรมการ
ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล

8 มีนาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือระหว่างการศึกษา และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ, รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์ และ ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี รวมถึง ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปติ์ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทุกท่านที่ให้โอกาสคำแนะนำ ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 1 (ภาคเหนือ) รวมถึงผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงาน ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน เอื้อเฟื้อและเป็นกำลังใจ

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้และหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คณรัศมิ์ ค้ำชู

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดฟัซซี่เพื่อแก้ปัญหาการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย

ผู้เขียน นายคณรัศมิ์ ค้ำชู

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. คมกฤต เล็กสกุล

249011

บทคัดย่อ

จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ผู้ให้บริการจำหน่ายไฟฟ้าต้องเผชิญกับความไม่สอดคล้องระหว่างการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้ไฟฟ้ากับข้อจำกัดทางงบประมาณในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบจำหน่าย ซึ่งปัญหาดังกล่าวทำให้หม้อแปลงจำหน่ายที่ติดตั้งอยู่เดิมมีขนาดไม่เหมาะสมกับโหลดหรือถูกใช้งานจนเกินพิกัด ทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือ การออกแบบใช้งานและสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่ายให้มีขนาดที่เหมาะสมกับโหลด ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการประมาณพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและเทคนิคการออกแบบการทดลองในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อแก้ปัญหาการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย

ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่า แนวโน้มของผลการทดลองที่ได้จากวิธีการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวให้ผลดีกว่าวิธีการครอสโอเวอร์แบบวงรอบ โดยอัตราครอสโอเวอร์และอัตรามิวเทชั่นที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.7147 และ 0.3563 ตามลำดับ และในการทดสอบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดประชากรกับจำนวนรุ่นของประชากรพบว่า ขนาดประชากรมีผลต่อผลตอบมากกว่าจำนวนรุ่นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบจะทำให้ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายในปีแรกที่ทำการสับเปลี่ยนคิดเป็นมูลค่า 464,980.91 บาท ลดปริมาณหม้อแปลงจำหน่ายที่ถูกใช้งานเกินพิกัดจากเดิม 32 เหลือเพียง 2 เครื่อง และสามารถลดค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการใช้ประโยชน์ได้สูงสุดถึงร้อยละ 4.58 ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาใช้งานของหม้อแปลงที่ติดตั้งอยู่เดิมมีเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการสลับใช้งานระหว่างหม้อแปลงจำหน่ายที่ติดตั้งใช้งานในระบบจำหน่ายเป็นรายปีอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงได้ และวิธีการดังกล่าวยังสามารถปรับเปลี่ยนระดับโหลดสูงสุดของหม้อแปลงจำหน่ายให้เป็นไปตามพึงพอใจของผู้ออกแบบระบบ

Thesis Title Fuzzy Mathematical Model for Solving Distribution Transformer Replacement Problem

Author Mr. Kanarat Khumchoo

Degrce Master of Engineering (Industrial Engineering)

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Komgrit Leksakul

ABSTRACT

249011

As the number of electricity users increase every year, many electric utility companies are faced with a discrepancy between the rating/size of the existing distribution transformer and its load as well as their limited budget. Consequently, this problem leads to transformer losses. Increasing the efficiency of distribution transformers can be done by designing the proper rating in addition to replacing existing transformers corresponding to their loads. In this study, a mathematical model integrated with energy loss estimation permutation based on Genetic Algorithms (GA), and designs of experiment were employed to solve this research problem.

The result from the experiment showed that using one-point crossover tends to get a better result than cycling crossover. The best crossover rate and mutation rate are 0.7147 and 0.3563 respectively. From the study of relationship between population size and generation, the experiment suggests that population size has far more importance than generation in terms of quality solutions.

Realistic examples showed that the optimum value could save capital costs in the first year by about 464,980.91 baht and reduce the number of 80 percent overload transformers from 32 to 2. Furthermore, the yearly effective rotation between existing transformers could decrease the energy loss problem. The utilization factors could also be reduced by up to 4.58 percent. Consequently, the electrical utility gains a longer lifetime of the distribution transformers with reduced damage caused by overrating operations. The benefits of this study are the sufficient and effective use of transformers for those within a limited budget and also, this method allows ease of the maximum transformer load change to satisfy the distribution system designer.

สารบาญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ค
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
สารบาญ		ฉ
สารบาญตาราง		ญ
สารบาญภาพ		ฏ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
	1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
	1.4 ประโยชน์ของการศึกษาที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2	ทฤษฎี แนวคิดและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 การวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ	5
	2.1.1 หลักเกณฑ์การออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ	5
	2.1.2 การประมาณค่าอัตราการเพิ่มของโหลดสำหรับหม้อแปลงจำหน่าย	6
	2.1.3 ขั้นตอนการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ	6
	2.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	8
	2.2.1 ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงจำหน่าย	8
	2.2.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	8
	2.2.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงจำหน่าย	9
	2.2.4 การลดกำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย	12
	2.2.4.1 การลดขนาดของหม้อแปลงจำหน่าย	12
	2.2.4.2 การเพิ่มค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลง	13
	2.3 โปรแกรมเชิงเส้นชนิดฟัซซี่	14
	2.4 วิธีเชิงพันธุกรรม	15

2.4.1 การเข้ารหัสโครโมโซม 16
2.4.2 การกำหนดประชากรเริ่มต้น 17
2.4.3 ฟังก์ชันค่าความเหมาะสม 17
2.4.4 การครอสโอเวอร์ 18
2.4.5 การมิวเทชั่น 19
2.4.6 การเลือก 20
2.4.7 การแทนที่ 20
2.4.8 โครงสร้างการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม 21
2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 22
2.5.1 การวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ 22
2.5.2 โปรแกรมเชิงเส้นชนิดฟัซซี่ 24
2.5.3 การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในระบบการทำงานและกระบวนการต่างๆ 25

บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม 32
3.1 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย 32
3.1.1 กลุ่มตัวอย่างหม้อแปลงจำหน่าย 32
3.1.2 ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงจำหน่าย 35
3.1.3 พิกัดจุดติดตั้งของหม้อแปลงจำหน่าย 36
3.1.4 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 38
3.1.5 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 39
3.1.6 ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 39
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 40
3.2.1 ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ 40
3.2.2 เงื่อนไข 41
3.2.3 ปริมาณฟัซซี่ 42
3.3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม 43
3.3.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย 43
3.3.2 การทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัย 43
3.3.3 การเข้ารหัสโครโมโซมแบบสลับเปลี่ยนลำดับ 44

3.3.4 ฟังก์ชั่นค่าความเหมาะสมและประชากรเริ่มต้น 44
3.3.5 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว 44
3.3.5.1 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว 45
3.3.5.2 การครอสโอเวอร์แบบวงรอบ 45
3.3.6 การมิวเทชั่นแบบแลกเปลี่ยน 46
3.3.7 การคัดเลือกแบบจัดลำดับ 47

บทที่ 4 การทดสอบโปรแกรมและผลการวิจัย 48
4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์และระบบปฏิบัติการที่ใช้ทดสอบ 48
4.2 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 48
4.2.1 ตัวแปรนำเข้า 49
4.2.2 ตัวแปรส่งออก 50
4.3 ค่าเริ่มต้นของการทดสอบ 50
4.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบวิธีเชิงพันธุกรรม 53
4.5 การวิเคราะห์แบบ Two Sample Test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลตอบ 54
4.6 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแบบจำลอง 58
4.7 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 62
4.7.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบด้านต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง 62
4.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบของค่าเฉลี่ยตัวประกอบการใช้ประโยชน์ 66
4.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบของสมการ (3.4) 69
4.7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบของสมการ (3.5) 73
4.7.5 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย 76
4.8 การวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับผลตอบด้านต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง 77
4.8.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดประชากรและจำนวนรุ่นที่มีต่อค่าผลตอบ 77
4.8.2 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบ 79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 85
5.1 สรุปผลการวิจัย 85
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 87

บรรณานุกรม 89

ภาคผนวก 92

ภาคผนวก ก ข้อมูลหม้อแปลงกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย 93

ภาคผนวก ข ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ Two Sample Test 128

ภาคผนวก ค ผลการทดลองเทคนิคการออกแบบพื้นผิวผลตอบด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง 131

ภาคผนวก ง ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดประชากรและจำนวนรุ่นของประชากรที่มีต่อค่าผลตอบ 133

ภาคผนวก จ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบโปรแกรม 135

ภาคผนวก ฉ รายละเอียดของเส้นทางการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 140

ประวัติผู้เขียน 153

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 จำนวนหม้อแปลงจำหน่ายชนิด 3 เฟสในพื้นที่ กฟน.1	1
1.2 จำนวนและอัตราการเพิ่มผู้ใช้ไฟในระหว่างปี 2548-2551	2
1.3 หน่วยจำหน่ายและหน่วยสูญเสียสำหรับปี 2546-2551 ในพื้นที่รับผิดชอบของ กฟน.1	3
2.1 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายชนิด 3 เฟส ของ กฟภ.	12
2.2 การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในระบบการทำงานด้านต่างๆ	29
3.1 จำนวนหม้อแปลงจำหน่ายแยกตามพื้นที่ของจุดติดตั้ง	32
3.2 ตัวอย่างพิกัดจุดติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายจากข้อมูลแผนที่ระบบไฟฟ้า	36
3.3 ตัวอย่างข้อมูลโหลดสูงสุดและจำนวนผู้ใช้ไฟแยกตามประเภท ณ แต่ละจุดจ่ายโหลดหม้อแปลงจำหน่าย	37
3.4 ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียที่ประมาณจากค่าตัวประกอบโหลด	38
3.5 ค่าอุปกรณ์-ค่าแรงตามประมาณการในการรื้อถอน/ติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายของ กฟภ.	39
4.1 ตัวแปรนำเข้าที่ใช้สำหรับโปรแกรมการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย	49
4.2 ตัวแปรส่งออกที่ใช้สำหรับโปรแกรมการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย	50
4.3 ค่าเริ่มต้นของระดับตัวประกอบการใช้ประโยชน์หม้อแปลงจำหน่ายแยกตามพื้นที่ติดตั้ง	51
4.4 ค่าเริ่มต้นของการทดสอบ	53
4.5 พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบวิธีเชิงพันธุกรรม	53
4.6 การประมาณผลกระทบและระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยในการทดลองที่มีผลต่อผลตอบ	60
4.7 การวิเคราะห์แหล่งของผลกระทบที่มีผลและทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลอง	61
4.8 การประมาณผลกระทบและระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยในการทดลองที่มีผลต่อผลตอบด้านต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง	63
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบที่มีผลต่อแบบจำลอง	64
4.10 การประมาณผลกระทบและระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยในการทดลองที่มีผลต่อผลตอบของค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์หม้อแปลงจำหน่าย	67
4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบที่มีผลต่อแบบจำลอง	68

4.12 การประมาณผลกระทบและระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยในการทดลองที่มีผลต่อผลตอบของสมการ (3.4) 71
4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบที่มีผลต่อแบบจำลอง 72
4.14 การประมาณผลกระทบและระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยในการทดลองที่มีผลต่อผลผลตอบของสมการ (3.5) 74
4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบที่มีผลต่อแบบจำลอง 75
4.16 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย 78
4.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อน-หลังการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 79
4.18 ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงจำหน่ายแยกตามพื้นที่ 82
4.19 พิกัดของหม้อแปลงจำหน่ายแยกตามพื้นที่ 82
4.20 ระยะทางของเส้นทางการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 83

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดกับตัวประกอบกำลังสูญเสีย	9
2.2	สัดส่วนโดยประมาณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง	10
2.3	ตัวอย่างการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว	18
2.4	ตัวอย่างการมิวเทชั่นแบบกลับบิท	19
2.5	โครงสร้างการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม	22
3.1	ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายของ กฟภ.	34
3.2	ภาพรวมของจุดติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายกลุ่มตัวอย่างบนแผนที่ระบบไฟฟ้า	36
3.3	ตัวอย่างจุดติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายกลุ่มตัวอย่างบนแผนที่ระบบไฟฟ้า	38
3.4	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณฟัซซี่รูปสี่เหลี่ยมคางหมู	43
3.5	ตัวอย่างการเข้ารหัสของโครโมโซม	44
3.6	ตัวอย่างรูปแบบการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว	45
3.7	ตัวอย่างรูปแบบการครอสโอเวอร์แบบวงรอบ	46
3.8	ตัวอย่างรูปแบบการมิวเทชั่นที่ใช้ในงานวิจัย	46
4.1	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย	48
4.2	พิกัดตำแหน่งของหม้อแปลงจำหน่ายกลุ่มตัวอย่างแยกตามพิกัดหม้อแปลง	52
4.3	Box-and-Whisker Plot ของค่าเฉลี่ยของต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง จากวิธีการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและแบบวงรอบ	54
4.4	Box-and-Whisker Plot ของค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการใช้ประโยชน์ จากวิธีการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและแบบวงรอบ	55
4.5	Box-and-Whisker Plot ของค่าเฉลี่ยของผลตอบจากสมการ (3.4) จากวิธีการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและแบบวงรอบ	56
4.6	Box-and-Whisker Plot ของค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จากสมการ (3.5) จากวิธีการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและแบบวงรอบ	57
4.7	กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบด้านต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง	58
4.8	กราฟแสดงพื้นที่ผลตอบของผลกระทบระหว่าง อัตราครอสโอเวอร์*อัตรามิวเทชั่น	61

4.9 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบด้านต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง 62
4.10 กราฟ Contour Plot แสดงของผลกระทบระหว่าง อัตราครอสโอเวอร์*อัตรามิวเทชั่น 65
4.11 ค่าที่เหมาะที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการสับเปลี่ยนหม้อแปลง 66
4.12 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบของค่าเฉลี่ยตัวประกอบการใช้ประโยชน์ 66
4.13 ค่าที่เหมาะที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยตัวประกอบการใช้ประโยชน์ 69
4.14 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบของสมการ (3.4) 70
4.15 ค่าที่เหมาะที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบของสมการ (3.4) 73
4.16 กราฟแสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูลผลตอบของสมการ (3.5) 73
4.17 ค่าที่เหมาะที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบของสมการ (3.5) 76
4.18 กราฟเมตริกแสดงผลตอบที่เกิดจากความสัมพันธ์ของขนาดประชากรและจำนวนรุ่นของประชากร 78
4.19 กราฟ Contour Plot แสดงพื้นที่ผลตอบที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของขนาดประชากรกับจำนวนรุ่นของประชากร 78
4.20 กราฟผลการทดสอบของต้นทุนรวมของการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 80
4.21 กราฟผลการทดสอบของต้นทุนค่าอุปกรณ์-ค่าแรง 80
4.22 กราฟผลการทดสอบของต้นทุนค่าขนส่ง 81
4.23 กราฟผลการทดสอบของต้นทุนพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด 81
4.24 เส้นทางการสับเปลี่ยนหม้อแปลงจำหน่าย 84