

บทที่ 5

ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์โดยใช้ระบบจำลอง

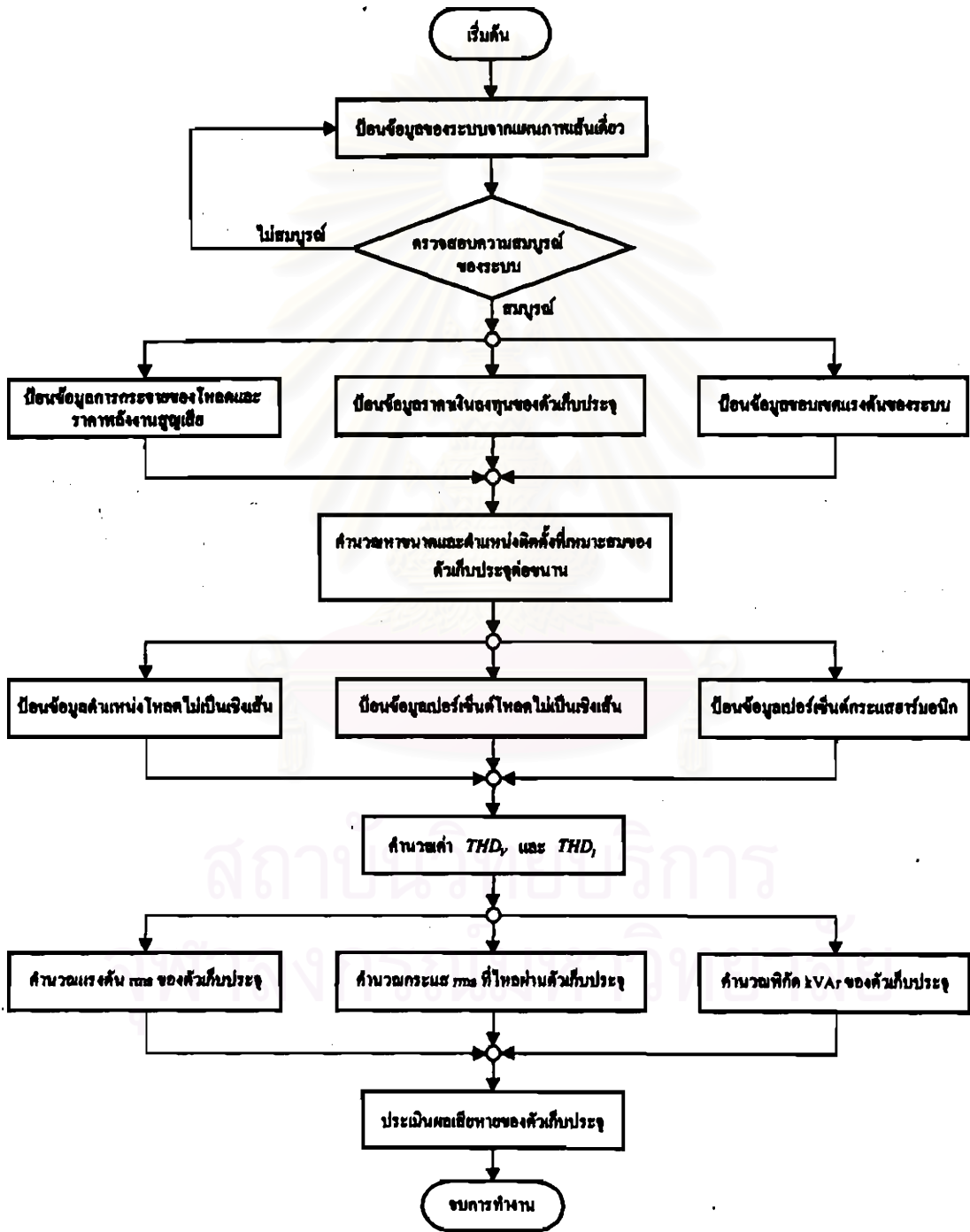
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน รวมถึงปริมาณทางฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย โดยการทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน โดยได้ใช้โปรแกรม วิชาการเบสิก รุ่นเอนเตอร์ไพรส์ เวอร์ชัน 4.0 (Microsoft Visual Basic 4.0 Enterprise) เป็นเครื่องมือในการพัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ให้มีความสามารถดีพอสมควร โดยเฉพาะเป็นภาษาที่ง่ายต่อการทำงานของโปรแกรม ทั้งยังสามารถติดต่อกับผู้ใช้ได้สะดวก เข้าใจง่าย และตอบสนองต่อการทำงานของผู้ใช้โปรแกรมได้คล่องตัวตามต้องการ โดยไม่ต้องเรียงลำดับก่อนหลังเหมือนวิธีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในรุ่นก่อนๆ ในบทนี้จะขอกกล่าวถึงโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงผลการคำนวณและการวิเคราะห์ของระบบทดสอบโดยใช้ระบบจำลอง

5.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น สามารถสร้างระบบจำหน่ายจำลองที่ผู้ใช้ต้องการขึ้นได้โดยการสร้างแผนภาพเส้นเดียว (Single Line Diagram) ลงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์โดยตรง ส่วนการรับข้อมูลของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- 1) ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ
 - ลักษณะการกระจายของโหลดใน 1 ปี (Load Duration)
 - ราคาเงินลงทุนต่อบีของตัวเก็บประจุ (Capacitor Investment Cost)
 - ราคาพลังงานสูญเสียของระบบจำหน่าย (Energy Loss Cost)
 - ขอบเขตแรงดันของระบบจำหน่าย (Voltage Constraint)
- 2) ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ
 - ตำแหน่งบัสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load Bus)
 - เปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Percent of Nonlinear Load)
 - เปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกแต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ($\% I^h$)

ถ้าสำหรับการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกัน โดยเริ่มจากการหาผลตอบของขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานก่อน ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หลังจากนั้นเป็นการประเมินหาความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุจากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นในบางตำแหน่งของระบบจำหน่าย ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5-1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์







5.2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบจำลอง

การป้อนข้อมูลของระบบจำลองสามารถทำได้โดยตรงจากการสร้างแผนภาพเส้นเคเบิล หลังจากสร้างแผนภาพเส้นเคเบิลเสร็จสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมจะทำการตรวจสอบลักษณะการเชื่อมต่อของระบบจำลอง เพื่อรองรับค่าพารามิเตอร์ของระบบจากการป้อนข้อมูลของผู้ใช้ และจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปสร้างตัวแทนของระบบจำหน่าย โดยในที่นี้หมายถึง การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus Admittance Matrix : $[Y_{bus}]$)

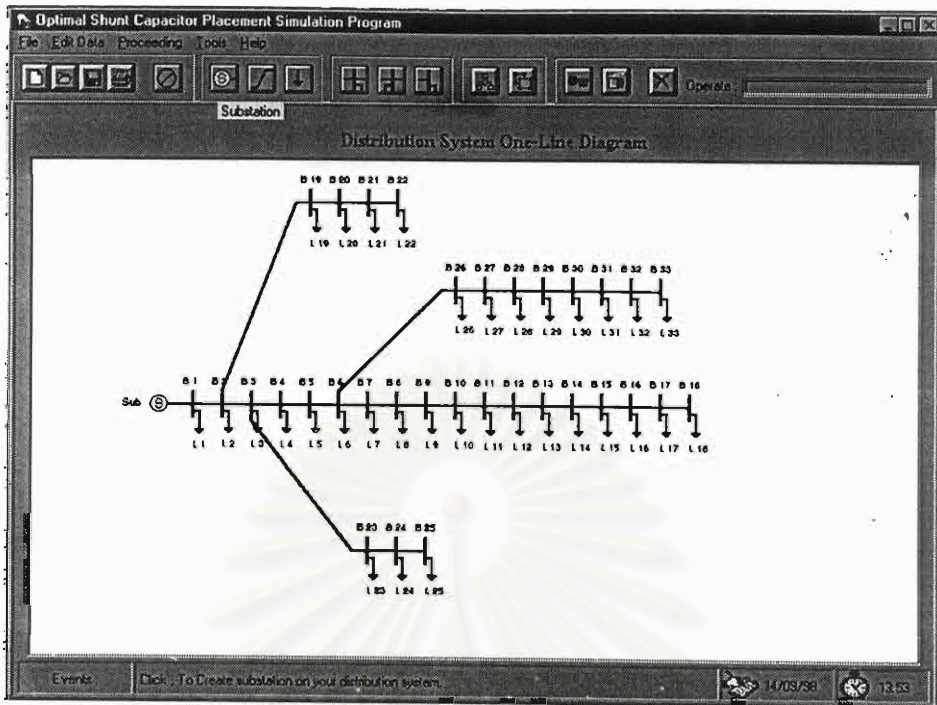
5.2.1 การสร้างระบบจำลองด้วยแผนภาพเส้นเคเบิล

จากสมมติฐานของวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ว่า ระบบที่จะทำการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาวะที่สมดุลกันทั้งสามเฟสจึงใช้แบบจำลองหนึ่งเฟสเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าได้ แผนภาพเส้นเคเบิลจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมและนิยมใช้ ผู้ใช้สามารถเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จะสร้างแผนภาพเส้นเคเบิลได้โดยการเลือกรูปภาพของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในโปรแกรม ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 รูปภาพและความหมายของอุปกรณ์ต่างๆ

รูปภาพ	ความหมาย
	สถานีไฟฟ้าย่อย
	บัสประเภทที่ 1
	บัสประเภทที่ 2
	บัสประเภทที่ 3
	สายป้อน
	โหลด

ค่าพารามิเตอร์สายและข้อมูลโหลดของระบบจำลอง จะสามารถป้อนค่าได้หลังจากสร้างแผนภาพเส้นเคเบิลเสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนต้องมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) สำหรับข้อมูลของโหลดจะรับเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แต่ละบัส โดยมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW) และกิโลวาร์ (kVAr) ตามลำดับ หน้าจอการสร้างแผนภาพเส้นเคเบิลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-2 หน้าจอแสดงการรับค่าพารามิเตอร์สายและโหลดของระบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5-3 และ 5-4 ตามลำดับ



รูปที่ 5-2 หน้าจอการสร้างแผนภาพเส้นเคเบิล

From Bus	To Bus	Resistance R (Ohm)	Reactance X (Ohm)	From Bus	To Bus	Resistance R (Ohm)	Reactance X (Ohm)	From Bus	To Bus	R
1	2	0.09220	0.04700							
2	3	0.49300	0.25110							
3	4	0.36600	0.18640							
4	5	0.38110	0.19410							
5	6	0.61900	0.70700							
6	7	0.18720	0.61880							
7	8	0.71140	0.23510							
8	9	1.03000	0.74000							
9	10	1.04400	0.74000							
10	11	0.19660	0.06500							
11	12	0.37440	0.12380							
12	13	1.46800	1.15500							

Base Voltage [KV] = 23.00 Total Load P [KW] = 375.00
 Base Power [KVA] = 2300.00 Total Load Q [KVar] = 2300.00
 Base Impedance [Ohms] = 230.00

รูปที่ 5-3 หน้าจอการรับค่าพารามิเตอร์สายของระบบจำลอง

Network Operation Data

Substation | Distribution Line | System Load

Bus No.	Load No.	Real Power P (KW)	Reactive Power Q (KVar)	Bus No.	Load No.	Real Power P (KW)	Reactive Power Q (KVar)
1	L1	0.00	0.00				
2	L2	100.00	60.00				
3	L3	90.00	40.00				
4	L4	120.00	80.00				
5	L5	60.00	30.00				
6	L6	60.00	20.00				
7	L7	200.00	100.00				
8	L8	200.00	100.00				
9	L9	60.00	20.00				
10	L10	60.00	20.00				
11	L11	45.00	30.00				
12	L12	60.00	35.00				

Normal Load | Clear All | Print | Add P | Add Q

Base Voltage (KV) = 23.00 | Total Load P (KW) = 3715.00
 Base Power (KVA) = 2300.00 | Total Load Q (KVar) = 2300.00
 Base Impedance (Ohms) = 230.00

1 Multiple

OK | Cancel

รูปที่ 5-4 หน้าจอการรับค่าโหลดของระบบจำลอง

Network Operation Data

Substation | Distribution Line | System Load

Voltage Generation

Substation Voltage

Voltage = 23 KV

X/R Ratio = 15

Base Power [KVA]

System BaseKVA

BaseKVA = 2300 KVA

Short Circuit Power = 120 MVA

Total Bus = 33 - Bus | Total Lateral = 3 - Lateral
 Total Branch = 29 - Branch

Note...
 Voltage Magnitude at Bus-1 is assumed to be constant and it's equal to the Substation Voltage.
 In this program Bus-1 is called to Substation - Bus

Base Voltage (KV) = 23.00 | Total Load P (KW) = 3715.00
 Base Power (KVA) = 2300.00 | Total Load Q (KVar) = 2300.00
 Base Impedance (Ohms) = 230.00

OK | Cancel

รูปที่ 5-5 หน้าจอการรับข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย

รูปที่ 5-5 แสดงส่วนการรับข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย ข้อมูลหลักที่ต้องการคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยมีหน่วยเป็นกิโลโวลท์ (kV) และค่า BaseKVA สำหรับค่าอัตราส่วน X/R (X/R ratio) และค่า MVA ลัดวงจร (MVA Short circuit) จะใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นส่วนของการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก จากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบจำหน่าย

5.2.2 การป้อนข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของตัวเก็บประจุ

ข้อมูลหลักที่ต้องการสำหรับส่วนนี้ คือ การกระจายของโหลดซึ่งถูกแบ่งออกเป็นระดับๆ ตามค่าเปอร์เซ็นต์โดยเทียบกับสถานะโหลดปกติ รวมถึงระยะเวลาที่เกิดในแต่ละช่วง โดยผลรวมของช่วงเวลาทั้งหมดจะต้องมีค่าเท่ากับ 8,760 ชั่วโมง (1 ปี) สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถยอมให้มีระดับของโหลดได้ 4 ระดับเท่านั้น หน้าจอการรับค่าการกระจายของโหลดแสดงได้ดังรูปที่ 5-6

System Operation Data

Load Duration and Cost Data For The System

Load Duration Cost

Load Levels and Time Interval

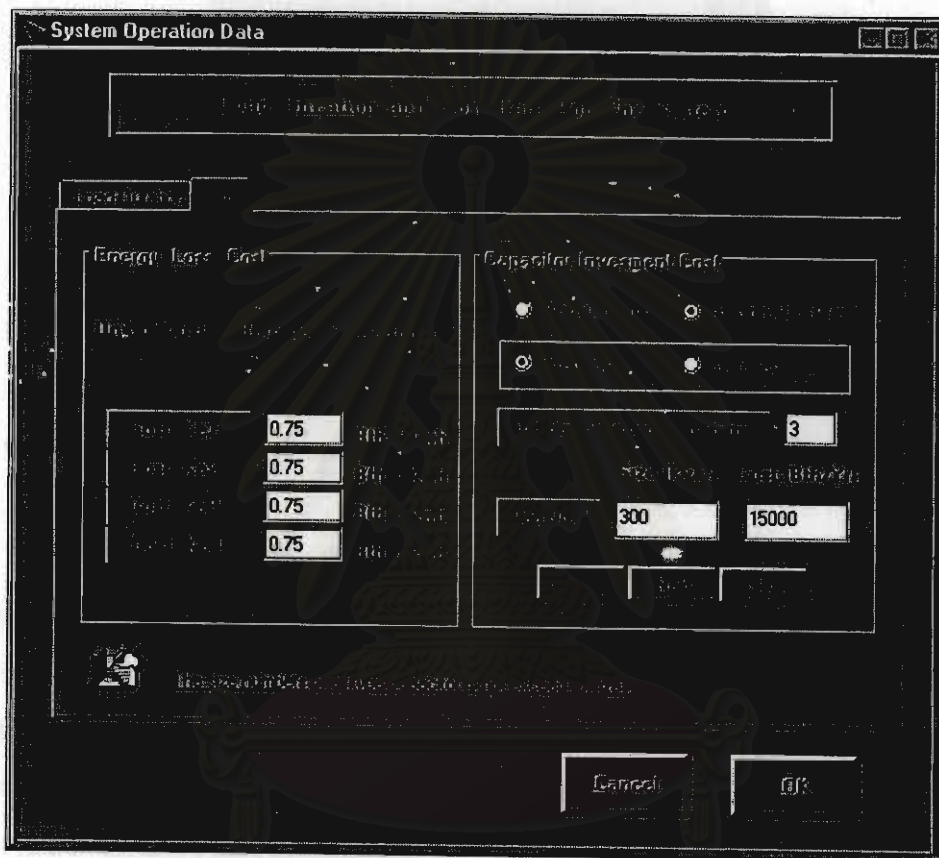
Levels of Load must be input in Percentage of Normal Load. Load level S1 is light load and load level S4 is peak load.

Level S1 :	40	x	Interval T1 :	1000	hours
Level S2 :	70	x	Interval T2 :	4500	hours
Level S3 :	90	x	Interval T3 :	2760	hours
Level S4 :	100	x	Interval T4 :	500	hours

Cancel OK

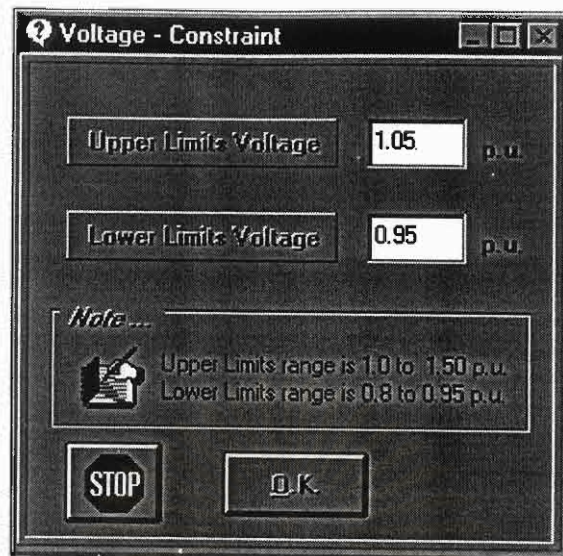
รูปที่ 5-6 หน้าจอการรับค่าการกระจายของโหลด

โดยปกติค่าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุทั้งแบบติดตั้งถาวร และแบบสับเข้า-ปลดออก จะถูกเก็บเป็นค่าดีฟอลท์ (Default) ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการระบุค่าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุเองทั้ง 2 แบบก็สามารถทำได้ หน้าจอการรับค่าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ และราคาพลังงานสูญเสียของระบบจำหน่าย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-7



รูปที่ 5-7 หน้าจอการรับค่าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุและราคาพลังงานสูญเสีย

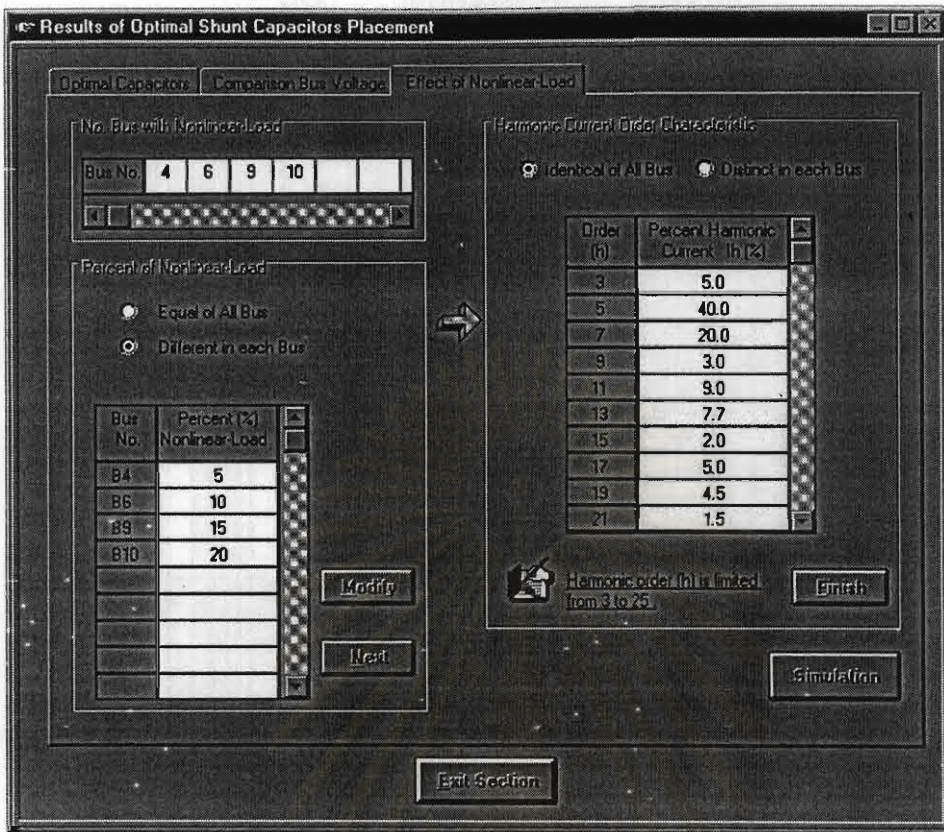
ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ สามารถระบุขอบเขตแรงดันของทั้งระบบได้ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีช่วงค่าแรงดันต่ำสุดตั้งแต่ 0.8 ถึง 0.95 p.u. และมีช่วงค่าแรงดันสูงสุดตั้งแต่ 1.0 ถึง 1.50 p.u. หน้าจอการรับค่าขอบเขตของแรงดันแสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 5-8 หน้าจอการรับค่าขอบเขตของแรงดัน

5.2.3 การป้อนข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ

หลังจากได้คำตอบของขนาดและตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุแล้ว การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ สามารถทำได้โดยการระบุตำแหน่งบัสที่มีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Percent of non-linear load) และค่าเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ($%I^n$) โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถระบุตำแหน่งบัสที่มีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ทุกบัส และค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นสามารถมีค่าที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ในแต่ละบัส หน้าจอการรับข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 5-9



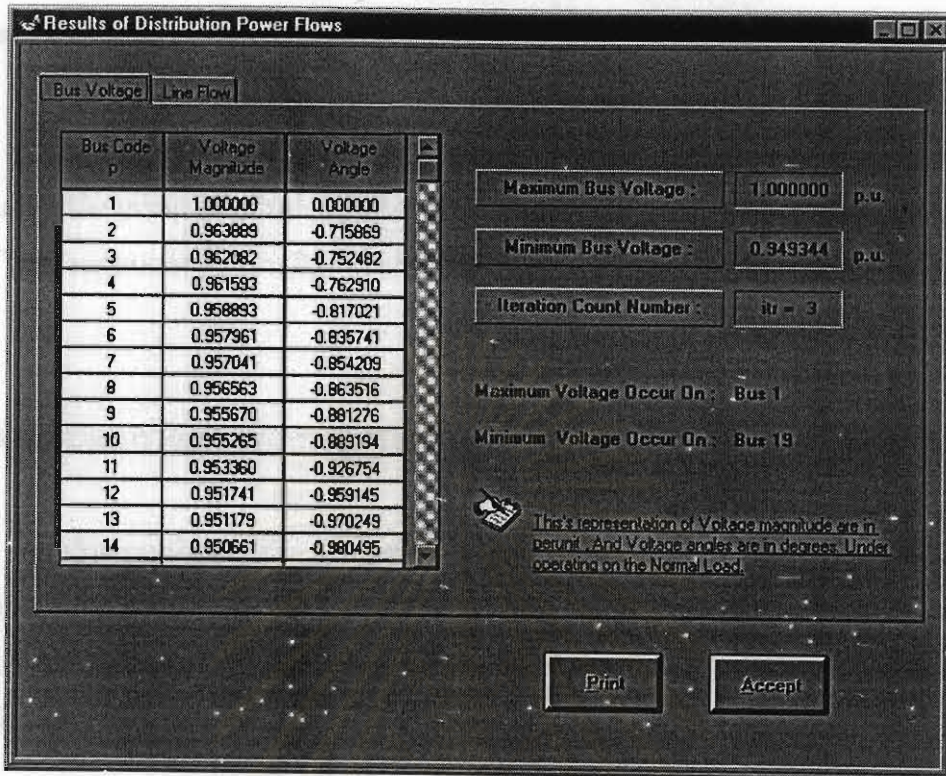
รูปที่ 5-9 หน้าจอการรับข้อมูลการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก

5.3 ส่วนการแสดงผลของโปรแกรม

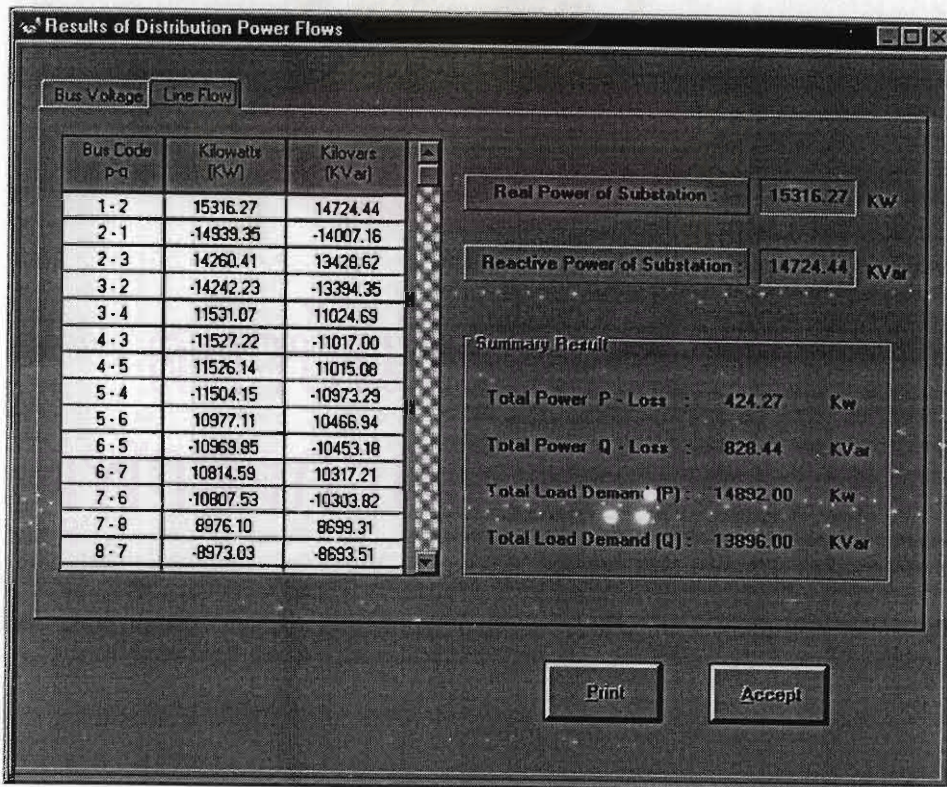
การแสดงผลของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามผลการวิเคราะห์ ดังนี้

5.3.1 ผลการคำนวณโหลดฟลว์

ในส่วนการคำนวณโหลดฟลว์ของระบบจำหน่าย จะแสดงผลของขนาดแรงดันและมุมที่บิตต่างๆ รวมถึงค่ากำลังงานที่ไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในส่วนต่างๆ ของสายป้อน (Line Flow) และค่ากำลังงานสูญเสียรวมของทั้งระบบ หน้าจอแสดงผลการคำนวณโหลดฟลว์แสดงดังรูปที่ 5-10 และ 5-11



รูปที่ 5-10 หน้าจอแสดงผลของขนาดแรงดันและมุมที่บัสต่างๆ



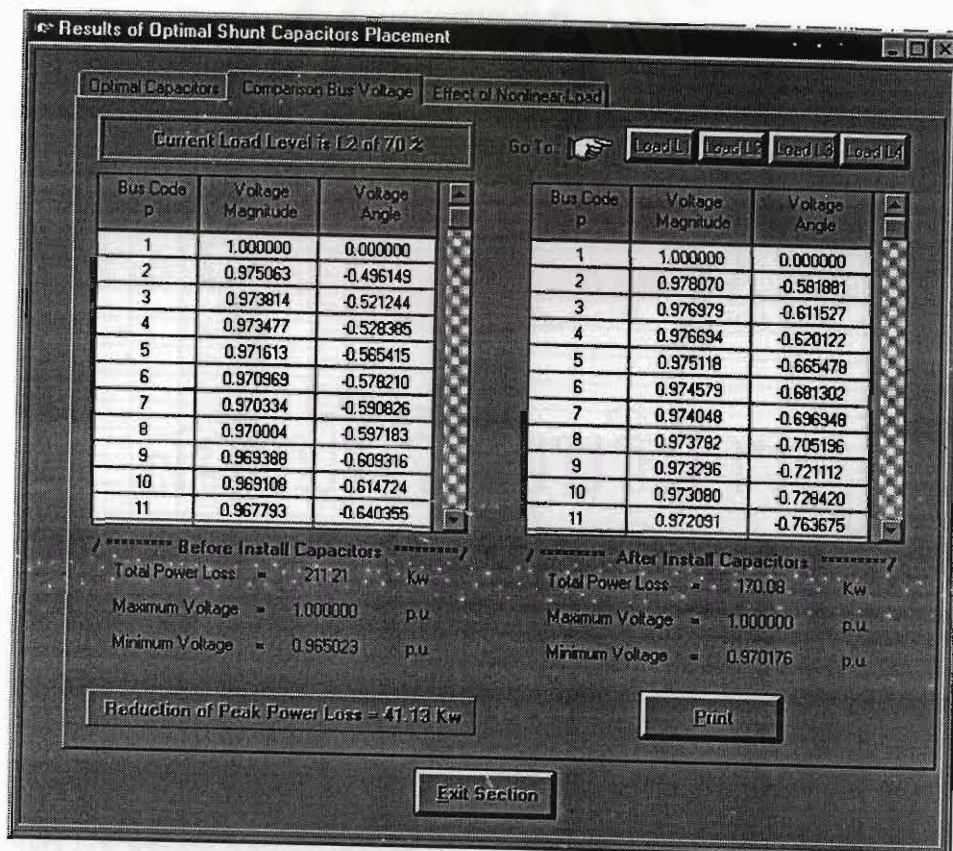
รูปที่ 5-11 หน้าจอแสดงผลการไหลของกำลังงานในสายป้อนแต่ละส่วน

5.3.2 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน

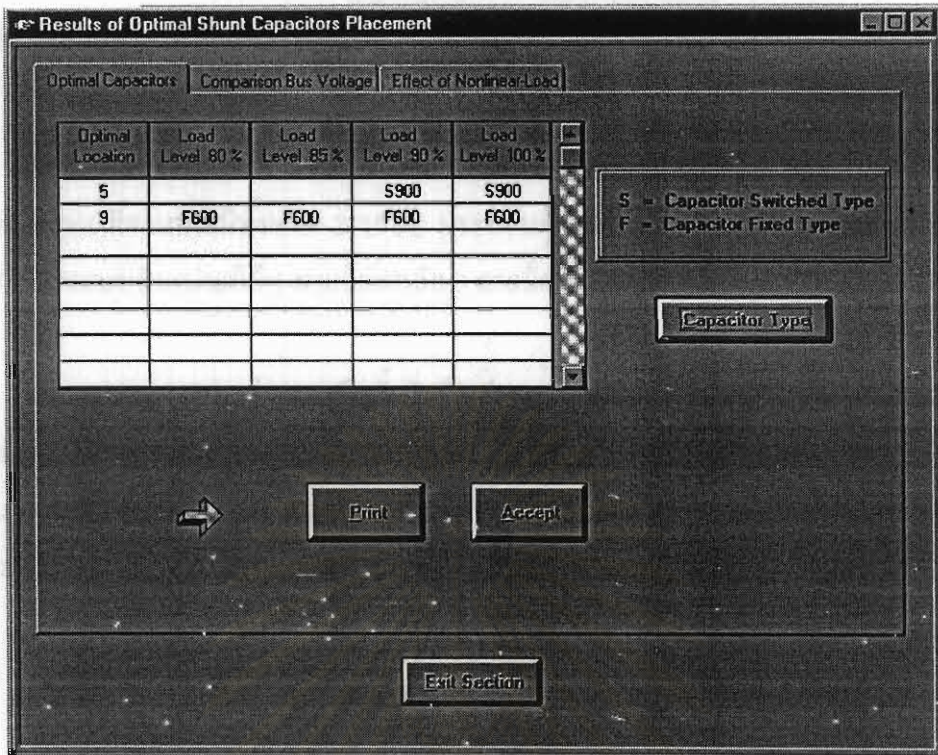
ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ได้จากโปรแกรม จะแสดงขนาดและตำแหน่งบัสติดตั้ง รวมถึงจำนวน และประเภทของตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของโหลดแต่ละระดับได้ด้วย ดังรูปที่ 5-12 และ 5-13

5.3.3 ส่วนแสดงการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก

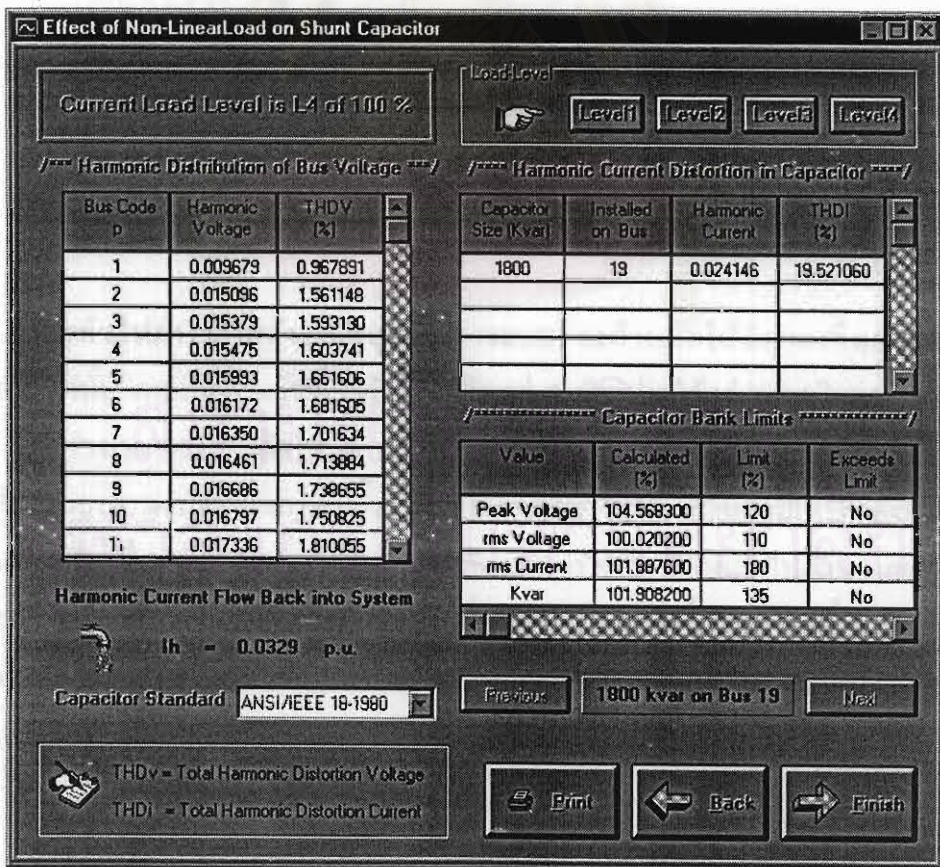
การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก สามารถแสดงผลได้ทั้งค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่แต่ละบัส (THD_v) ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (THD_i) และค่าพิคคของตัวเก็บประจุที่คำนวณโดยกิกคผลของฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 5-14



รูปที่ 5-12 หน้าจอแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่บัสต่างๆ



รูปที่ 5-13 หน้าจอแสดงผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน



รูปที่ 5-14 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก

5.4 ระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างของระบบจำหน่ายที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน ที่จะเสนอมีทั้งหมด 2 ระบบ ประกอบด้วยระบบจำหน่ายที่มีแต่สายป้อนหลักขนาด 19 บัส และระบบจำหน่ายที่มี 1 สายป้อนหลัก 3 สายป้อนย่อย ขนาด 33 บัส

ในการทดสอบของส่วนการติดตั้งตัวเก็บประจุ จะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลที่มีผลต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่เป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้ จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function equation) หรือสมการที่ใช้คำนวณค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุในสมการที่ (3.1) ซึ่งนิยามว่า

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^I C_i + \sum_{j=1}^L k_{e,j} T_j P_{loss,j}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานมีด้วยกัน 3 ตัวแปร คือ

- (1) ราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ (C_i)
- (2) ราคาพลังงานสูญเสียของระบบ ($k_{e,j}$)
- (3) ระยะเวลาของการเกิดโหลดในแต่ละระดับ (T_j)

โดยทั่วไปค่าราคาพลังงานสูญเสียของระบบ จะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดของโหลดทุกระดับ ดังนั้น คงเหลือตัวแปรที่เป็นปัจจัยสำคัญอยู่ 2 ตัวแปร ได้แก่ ราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุ และช่วงเวลาของการเกิดโหลด กล่าวคือ ถ้ากำหนดราคาเงินลงทุนต่อปีเบื้องต้นของตัวเก็บประจุให้มีค่าสูงๆ ผลลัพธ์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุอาจหาไม่ได้ หรืออาจมีการติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวนน้อยตัว เนื่องจากเกิดความไม่คุ้มทุนเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปเนื่องจากผลของกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ ส่งผลให้ในบางครั้งผลการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ได้ อาจทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะแสดงให้เห็นจากระบบทดสอบขนาด 19 บัส

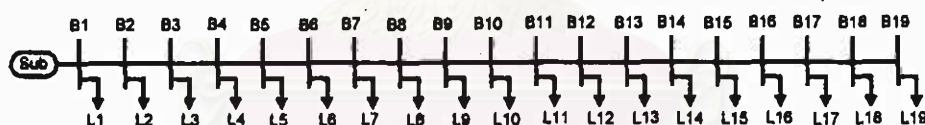
สำหรับระยะเวลาของการเกิดโหลดในแต่ละระดับ จะเป็นปัจจัยสำคัญต่อประเภทของตัวเก็บประจุที่จะทำการติดตั้ง กล่าวคือ จากวิธีการที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 การวิเคราะห์จะเริ่มจากระดับ

โหลดที่ต่ำสุดก่อน โดยประเภทของตัวเก็บประจุที่พิจารณาจะมีเฉพาะตัวเก็บประจุแบบถาวรเท่านั้น (Fixed Capacitor) ดังนั้น ระยะเวลาของการเกิดโหลดในระดับต่ำสุด จึงมีความสำคัญต่อประเภทของตัวเก็บประจุ โดยถ้า ระยะเวลาของการเกิดโหลดระดับต่ำสุดมีค่ามาก ก็อาจส่งผลให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรในระบบ ในทางตรงข้าม ถ้าระยะเวลาของการเกิดโหลดระดับต่ำสุดมีค่าน้อย ก็อาจส่งผลให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก (Switched Capacitor) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นจากระบบทดสอบขนาด 33 บั๊ต

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์โมนิก จะแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบจำหน่าย ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ อาจทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าสูงเกินกว่าค่าพิกัดกระแสของตัวเก็บประจุ และทำให้ตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายได้

5.4.1 ระบบทดสอบขนาด 19 บั๊ต

เป็นระบบจำหน่ายระดับแรงดัน 22 kV ที่มีแต่สายป้อนหลักอย่างเดียว ดังรูปที่ 5-15 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลของโหลดแสดงในตารางที่ 5-2



รูปที่ 5-15 แผนภาพวงจรเส้นเดียวของระบบขนาด 19 บั๊ต

ตารางที่ 5-2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลโหลดของระบบ 19 บั๊ต

Bus Code	Resistance	Reactance	Active Power	Reactive Power
p - q	R (Ohms)	X (Ohms)	P (kW) at bus q	Q (kVAr) at bus q
1 - 2	0.40414	0.76908	672.0	588.0
2 - 3	0.02130	0.04017	2720.0	2380.0
3 - 4	0.00678	0.01355	0.0	0.0
4 - 5	0.03872	0.07357	528.0	508.0
5 - 6	0.01404	0.02662	156.0	136.0
6 - 7	0.01404	0.02662	1840.0	1612.0

ตารางที่ 5-2(ต่อ) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลโหลดของระบบ 19 บัส

Bus Code	Resistance	Reactance	Active Power	Reactive Power
p - q	R (Ohms)	X (Ohms)	P (kW) at bus q	Q (kVAr) at bus q
7 - 8	0.00871	0.01646	672.0	648.0
8 - 9	0.01742	0.03340	688.0	664.0
9 - 10	0.00871	0.01646	576.0	556.0
10 - 11	0.04404	0.08373	512.0	496.0
11 - 12	0.04017	0.07696	0.0	0.0
12 - 13	0.01404	0.02662	512.0	496.0
13 - 14	0.01404	0.02662	1776.0	1716.0
14 - 15	0.01404	0.02662	192.0	184.0
15 - 16	0.00532	0.01016	864.0	836.0
16 - 17	0.01742	0.03340	1200.0	1160.0
17 - 18	0.03533	0.06679	1120.0	1080.0
18 - 19	0.00871	0.01646	864.0	836.0

หมายเหตุ ในการคำนวณจะกำหนดให้บัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง (Reference Bus)

ค่า Base kV = 22 ค่า Base kVA = 13896 ค่า Base Impedance = 34.83 Ω

Total Active Power = 14892 kW Total Reactive Power = 13896 kVAr

Base Current = 364.67

(ก) กรณีขนาดของตัวเก็บประจุแบบดับเข้า-ปลดออกมีขนาดเดียว

ในการวิเคราะห์สำหรับกรณีนี้ ข้อมูลราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุทั้งแบบติดตั้งถาวรและแบบดับเข้า-ปลดออกในตารางที่ 5-4 เป็นข้อมูลที่การไฟฟ้าใช้พิจารณาในการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย โดยมีหน่วยของราคาเงินลงทุนเป็นบาทต่อปี การกระจายของโหลดใน 1 ปีของระบบ แสดงในตารางที่ 5-3 สำหรับราคาพลังงานสูญเสีย (Ke) จะสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาของโหลดทุกๆ ระดับ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.75 บาท/กิโลวัตต์.ชม.

ตารางที่ 5-3 การกระจายของโหลดของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

ระดับโหลด (%)	40	70	90	100
ระยะเวลา (ชม.)	1000	4500	2760	500
ราคาพลังงานสูญเสีย (Ke)	0.75	0.75	0.75	0.75

ตารางที่ 5-4 ราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

Fixed Capacitor	Annual Cost (Bath)
300 kVAr	9,000
600 kVAr	15,000

Switch Capacitor	Annual Cost (Bath)
1800 kVAr	102,000

ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุ แสดงไว้ในตารางที่ 5-5 โดยกำหนดขอบเขตแรงดันของระบบที่แรงดันสูงสุดเท่ากับ 1.05 pu. และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ 0.95 pu. โดยที่ S หมายถึง ตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก

ตารางที่ 5-5 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขบวนของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

ตำแหน่งติดตั้ง ตัวเก็บประจุ	ระดับโหลด			
	40 %	70 %	90 %	100 %
บัส 19	-	1800 S	1800 S	1800 S

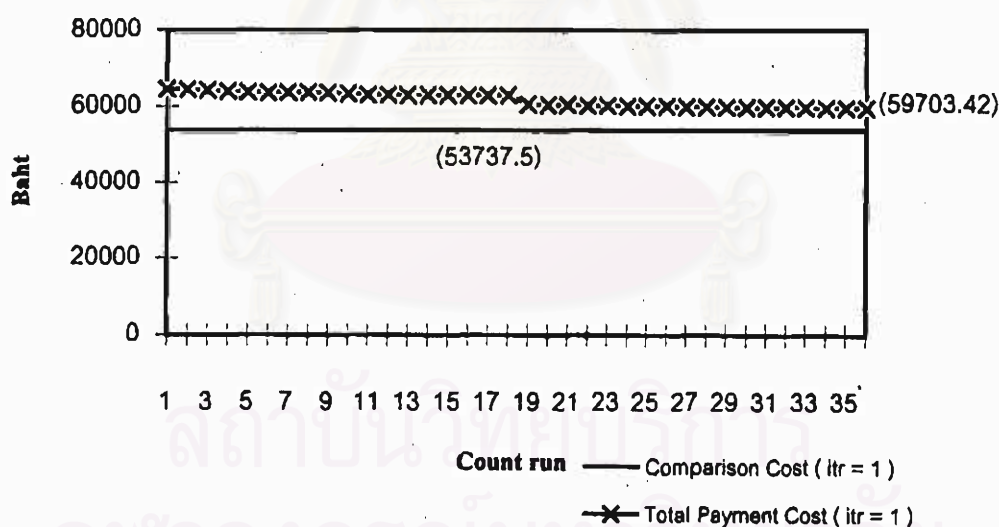
ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดัน และกำลังงานสูญเสียของทั้งระบบ รวมถึงค่าใช้จ่ายรวม (Total Payment Cost) ที่คำนวณได้ตามสมการที่ (3.1) ในสภาวะก่อนการติดตั้งและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขบวน ของโหลดแต่ละระดับ แสดงไว้ในตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงคืนและกำลังสูญเสียของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

ระดับโหลด	70 %		90 %		100 %	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
ลำดับการติดตั้ง						
V_{max} p.u.	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
V_{min} p.u.	0.96502	0.97038	0.95460	0.96006	0.949344	0.95486
Payment Cost (B)	758,733.7	725,731.3	782,708.4	670,079.7	176,490.0	153,180.0
Total Loss (kW)	224.81	184.81	378.12	323.71	470.64	408.48
Loss Reduce (kW)	40.00		54.41		62.16	

หมายเหตุ ค่าใช้จ่ายรวมหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90% และ 100% ไม่ต้องนำราคากำหนดของตัวเก็บประจุเข้ามารวมด้วย สำหรับค่าแรงคืนทั้งระบบของบัสต่างๆ ในสภาวะก่อนการติดตั้งและหลังการติดตั้งที่โหลดแต่ละระดับสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก

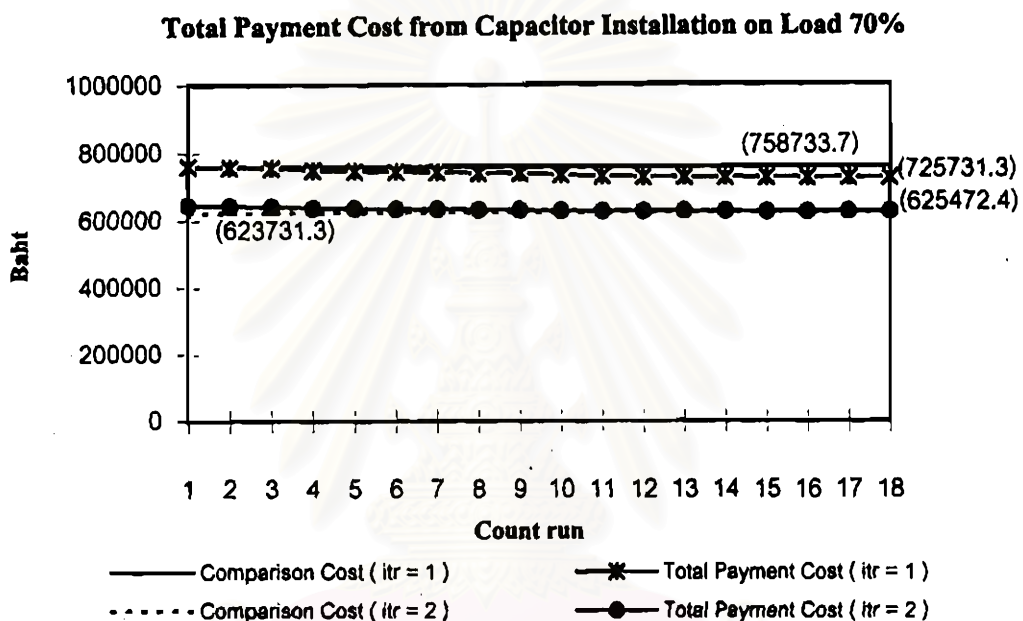
Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 40%



รูปที่ 5-16 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 40% ของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

เพื่อให้เข้าใจมากขึ้น สามารถพิจารณาผลการติดตั้งตัวเก็บประจุในการคำนวณแต่ละรอบที่ระดับโหลดต่างๆ ได้จากรูปที่ 5-16 ถึง 5-19 ซึ่งจะแสดงถึงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุทุกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงคืน กับค่าใช้จ่ายเนื่องจากผลของกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าจะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุหรือไม่

จากรูปที่ 5-16 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 53,737.50 บาท ซึ่งแสดงด้วยเส้นตรงทึบ จะเห็นว่าค่าใช้จ่ายรวมจากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุทุกกรณีที่อยู่ในเงื่อนไขของแรงดัน ค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุดคำนวณได้เท่ากับ 59,703.42 บาท ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าใช้จ่ายก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 40% นี้



รูปที่ 5-17 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ก)

จากรูปที่ 5-17 จำนวนรอบการคำนวณมีทั้งหมด 2 รอบ โดย

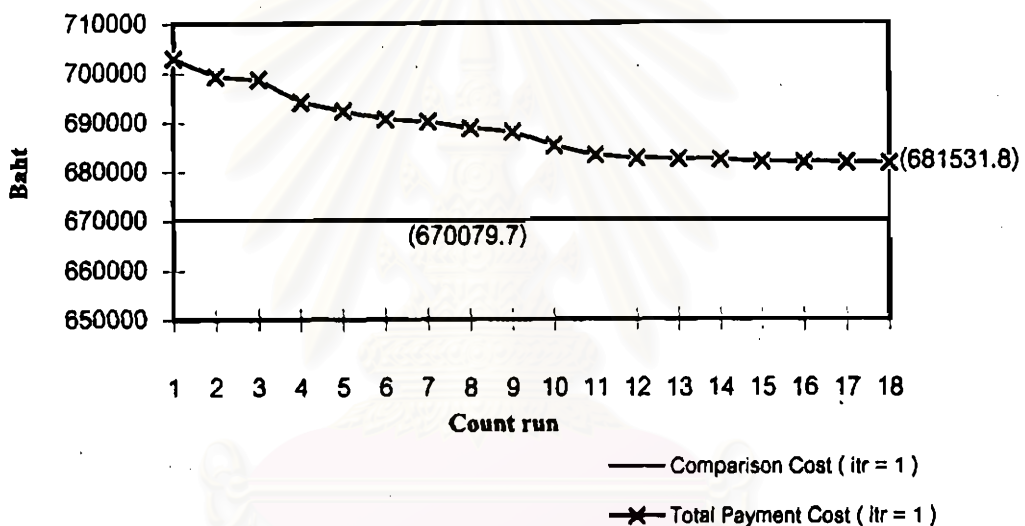
การคำนวณรอบแรก (Iteration = 1)

ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุคิดเป็นเงินเท่ากับ 758,733.75 บาท ($224.81 \text{ kW} \times 0.75 \text{ Bth/kWhr} \times 4500 \text{ hr}$) ในการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุได้กรณีที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดคิดเป็นเงินเท่ากับ 725,731.30 บาท โดยทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ที่บัต์ 19

การคำนวณรอบที่สอง (Iteration = 2)

ค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบ (Comparison Cost) สามารถคำนวณได้โดยนำค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุของการคำนวณในรอบแรก (725,731.30) หักออกด้วยราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในรอบแรกตามข้อมูลที่กำหนดไว้ข้างต้น (102,000) คิดเป็นเงินเท่ากับ 623,731.30 บาท (725,731.30-102,000) จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุในรอบที่สอง พบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบนี้ ดังนั้นคำตอบที่ได้ในระดับโหลด 70% คือทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVA_r ที่บัส 19 จำนวนเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น

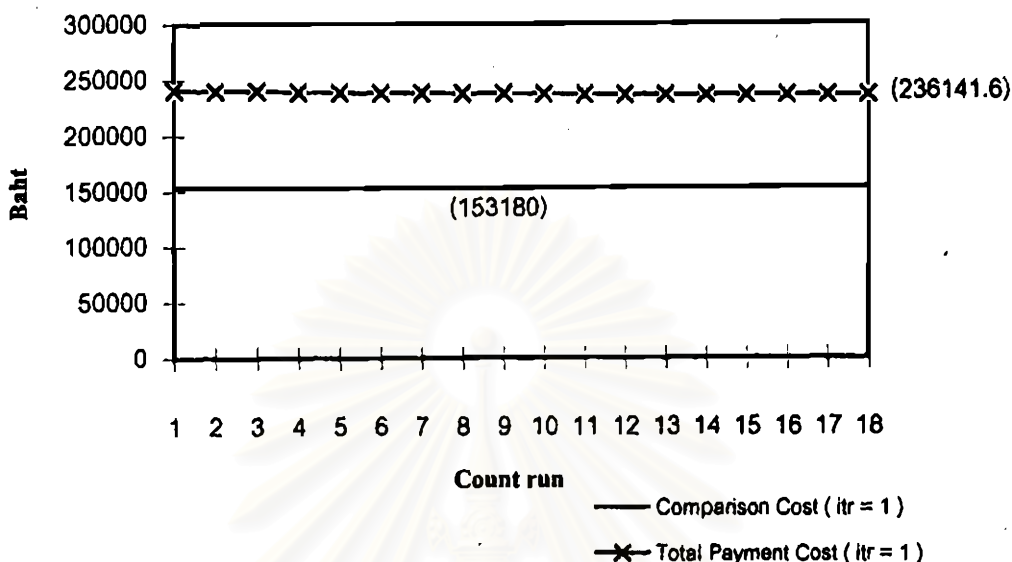
Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 90%



รูปที่ 5-18 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90% ของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

จากรูปที่ 5-18 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVA_r ที่บัส 19 (พิจารณาผลการติดตั้งตัวเก็บประจุตามตารางที่ 5-5) แต่ไม่รวมราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 670,079.70 บาท (323.71 kW × 0.75 Bth/kWhr × 2760 hr) ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน พบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 90%

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 100%



รูปที่ 5-19 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 19 บัส กรณี (ก)

ในลักษณะเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 5-19 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ที่บัส 19 แต่ไม่รวมราคาลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 153180.0 บาท ($408.48 \text{ kW} \times 0.75 \text{ Bth/kWhr} \times 500 \text{ hr}$) ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน พบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 100% เช่นเดียวกัน

(ข) กรณีขนาดของตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกมีหลายขนาด

จากผลการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณี (ก) (ตารางที่ 5-5) จะเห็นว่าจำนวนของตัวเก็บประจุที่ติดตั้งมีเพียงตัวเดียว คือ 1800 kVAr ที่บัส 19 เนื่องจากว่าตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกที่ใช้ในการวิเคราะห์มีเพียงขนาดเดียว ซึ่งมีค่าพิกัด kVAr และเงินลงทุนต่อปีที่สูง ทำให้การติดตั้งตัวเก็บประจุจำนวนสองตัวขึ้นไปอาจไม่เหมาะสม ดังนั้นในกรณี (ข) จึงได้ทำการทดสอบโดยสมมติให้ขนาดของตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกมีหลายขนาด โดยมีราคาต่อกิโลวัตต์เท่ากับตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ดังตารางที่ 5-7 ทั้งนี้ลักษณะการกระจายของโหลดเป็นดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-7 ราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุของระบบ 19 บัส กรณี (ข)

Fixed Capacitor	Annual Cost (Bath)
300 kVAr	9,000
600 kVAr	15,000

Switch Capacitor	Annual Cost (Bath)
600 kVAr	34,000
900 kVAr	51,000
1200 kVAr	68,000

Cost per kVAr of Switch Capacitor = 56.667 (102,000 Bth / 1800 kVAr)

ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุและผลการเปรียบเทียบแรงดัน รวมถึงกำลังงานสูญเสียของระบบ ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ แสดงไว้ในตารางที่ 5-8 และ 5-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-8 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาดของระบบ 19 บัส กรณี (ข)

ตำแหน่งติดตั้ง ตัวเก็บประจุ	ระดับโหลด			
	40 %	70 %	90 %	100 %
บัส 17	-	S 1200	S 1200	S 1200
บัส 19	-	S 1200	S 1200	S 1200

ตารางที่ 5-9 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกำลังสูญเสียของระบบ 19 บัส กรณี (ข)

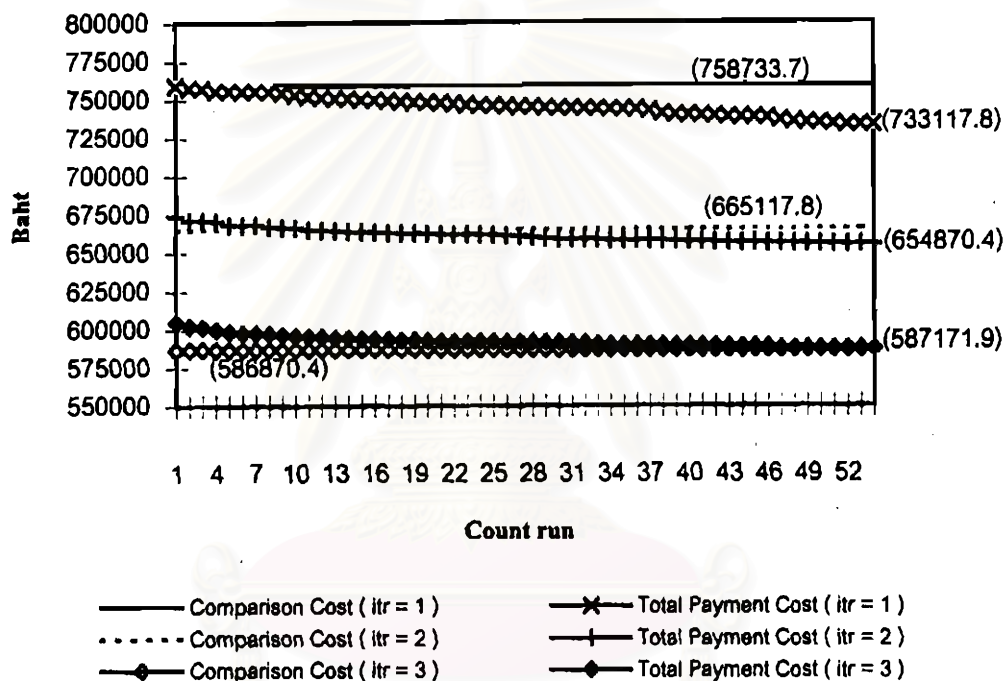
ระดับโหลด	70 %		90 %		100 %	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
ลำดับการติดตั้ง						
V_{max} p.u.	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
V_{min} p.u.	0.96502	0.97198	0.95460	0.96171	0.94934	0.95650
Payment Cost (B)	758,733.7	722,870.4	782,708.4	637,166.7	176,490.0	146,392.5
Total Loss (kW)	224.81	173.89	378.12	307.81	470.64	390.38
Loss Reduce (kW)	50.92		70.31		80.26	

จากผลในตารางที่ 5-9 จะสังเกตเห็นว่าที่ระดับโหลด 70% , 90% และ 100% กำลังสูญเสียของทั้งระบบ (Total Loss) หลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลในตารางที่ 5-6 ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุก็มีค่าต่ำกว่าด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการกำหนดให้ขนาดของตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกมิได้หลายขนาด ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุอาจดีกว่าในด้าน

การลงทุนและการลดกำลังงานสูญเสียของทั้งระบบ (สำหรับค่าแรงคืนที่บิตต่างๆ ของโหลดแต่ละระดับสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก)

รูปที่ 5-20 ถึง 5-22 แสดงให้เห็นถึงจำนวนรอบในการคำนวณ และจำนวนตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นในการติดตั้ง โดยแสดงระดับโหลดเพียง 3 ระดับ เนื่องจากระดับ 40% ไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณี (ก)

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 70%



รูปที่ 5-20 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70% ของระบบ 19 บิตกรณี (ข)

จากรูปที่ 5-20 จำนวนรอบในการคำนวณมีทั้งหมด 3 รอบ โดย

การคำนวณรอบแรก (Iteration = 1)

ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุคิดเป็นเงินเท่ากับ 758,733.75 บาท ($224.81 \text{ kW} \times 0.75 \text{ Bth/kWhr} \times 4500 \text{ hr}$) และจากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุในรอบแรกได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเท่ากับ 733,117.80 บาท โดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกขนาด 1200 kVAr ที่บิต 19

การคำนวณรอบที่สอง (Iteration = 2)

ค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบสามารถคำนวณได้จาก การนำค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ได้ในรอบแรก หักออกด้วยราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุดังกล่าว คิดเป็นเงินเท่ากับ 665,117.80 บาท (733,117.80-68,000) การทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุในรอบที่สองได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเท่ากับ 654,870.40 บาท โดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกขนาด 1200 kVAr ที่ บัส 17

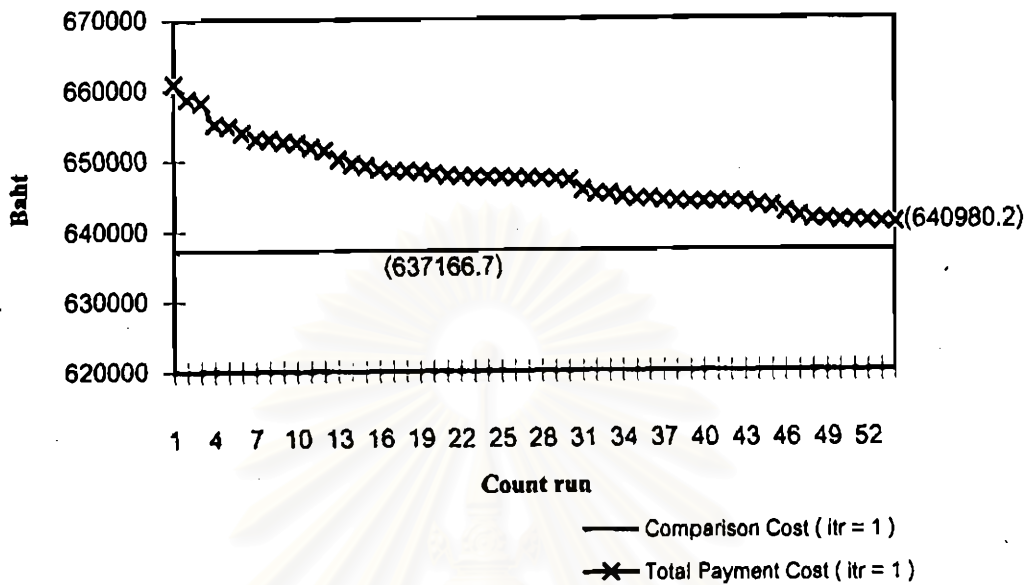
การคำนวณรอบที่สาม (Iteration = 3)

ค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบสามารถคำนวณได้โดยนำค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่หาได้ในรอบที่สอง (654,870.40) หักออกด้วยราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุที่หาได้ในรอบที่สอง (68,000) คิดเป็นเงินเท่ากับ 586,870.40 บาท (654,870.40 - 68,000) การทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุในรอบที่สามได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเท่ากับ 587,171.90 บาท ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบของรอบที่สาม ดังนั้นกระบวนการจะสิ้นสุดที่การคำนวณรอบที่สาม โดยไม่ต้องติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มอีก

จากรูปที่ 5-21 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1200 kVAr ที่บัส 19 และบัส 17 (พิจารณาผลการติดตั้งตัวเก็บประจุตามตารางที่ 5-8) แต่ไม่รวมราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 637,166.70 บาท ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน ไม่พบกรณีที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบ ดังนั้นจึงไม่ต้องติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 90%

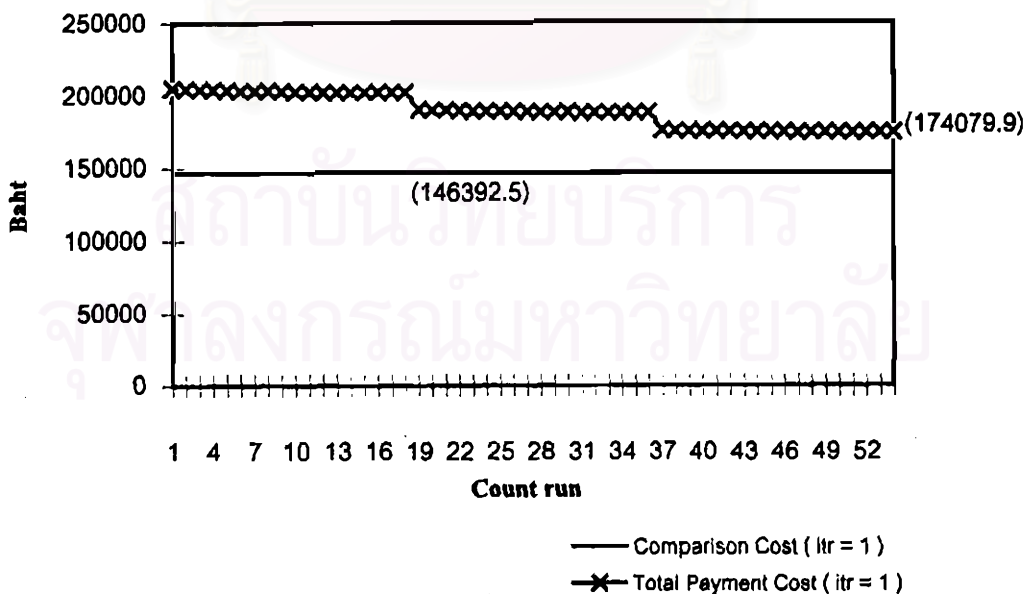
จากรูปที่ 5-22 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งสามตัว (ตามผลในตารางที่ 5-8) แต่ไม่รวมราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 146,392.50 บาท ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน พบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 100% เช่นเดียวกัน

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 90%



รูปที่ 5-21 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90% ของระบบ 19 บั๊ต กรณี (ข)

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 100%

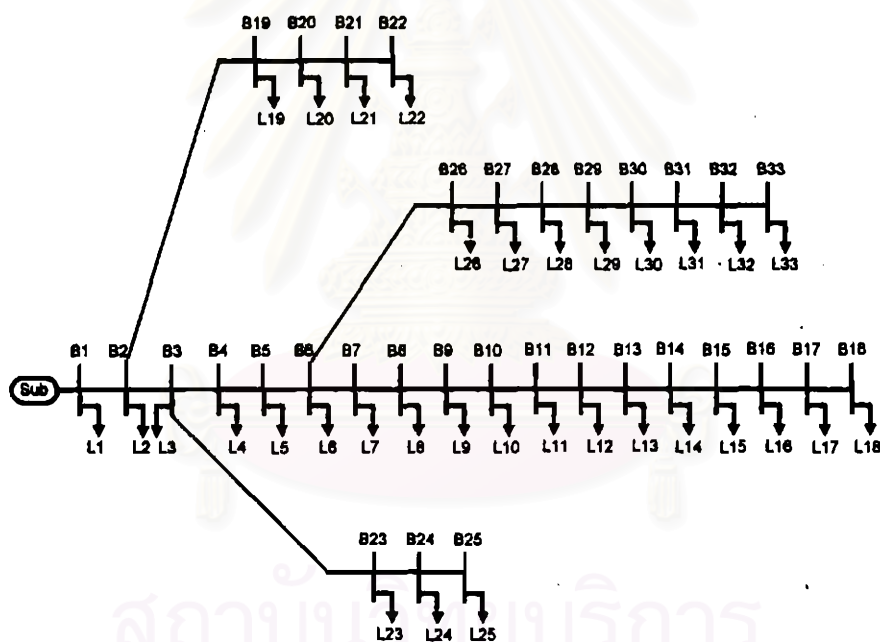


รูปที่ 5-22 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 19 บั๊ต กรณี (ข)

จากผลการทดสอบทั้ง 2 กรณี จะเห็นได้ว่าราคาลงทุนต่อปีและขนาดของตัวเก็บประจุ เป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งส่งผลทำให้ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ได้แตกต่างกัน

5.4.2 ระบบทดสอบขนาด 33 บัส

เป็นระบบจำหน่ายที่มี 1 สายป้อนหลัก และ 3 สายป้อนย่อย แผนภาพวงจรเส้นเดียวของระบบแสดงดังรูปที่ 5-23 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลโหลดแสดงในตารางที่ 5-10



รูปที่ 5-23 แผนภาพวงจรเส้นเดียวของระบบทดสอบขนาด 33 บัส

ตารางที่ 5-10 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 33 บัส

Bus Code	Resistance	Reactance	Active Power	Reactive Power
p - q	R (Ohms)	X (Ohms)	P (kW) at bus q	Q (kVAr) at bus q
1 - 2	0.09220	0.04700	250.00	150.00
2 - 3	0.49300	0.25110	225.00	100.00
3 - 4	0.36600	0.18640	300.00	200.00
4 - 5	0.38110	0.19410	150.00	75.00
5 - 6	0.81900	0.70700	150.00	50.00
6 - 7	0.18720	0.61880	500.00	250.00
7 - 8	0.71140	0.23510	500.00	250.00
8 - 9	1.03000	0.74000	150.00	50.00
9 - 10	1.04400	0.74000	150.00	50.00
10 - 11	0.19660	0.06500	112.50	75.00
11 - 12	0.37440	0.12380	150.00	87.50
12 - 13	1.46800	1.15500	150.00	87.50
13 - 14	0.54160	0.71290	300.00	200.00
14 - 15	0.59100	0.52600	150.00	25.00
15 - 16	0.74630	0.54500	150.00	50.00
16 - 17	1.28900	1.72100	150.00	50.00
17 - 18	0.73200	0.57400	225.00	100.00
2 - 19	0.16400	0.15650	225.00	100.00
19 - 20	1.50420	1.35540	225.00	100.00
20 - 21	0.40950	0.47840	225.00	100.00
21 - 22	0.70890	0.93730	225.00	100.00
3 - 23	0.45120	0.30830	225.00	125.00
23 - 24	0.89800	0.70910	1050.00	500.00
24 - 25	0.89600	0.70110	1050.00	500.00
6 - 26	0.20300	0.10340	150.00	62.50
26 - 27	0.28420	0.14470	150.00	62.50
27 - 28	1.05900	0.93370	150.00	50.00

ตารางที่ 5-10 (ต่อ) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูลโหลดของระบบทดสอบ 33 บัส

Bus Code	Resistance	Reactance	Active Power	Reactive Power
p - q	R (Ohms)	X (Ohms)	P (kW) at bus q	Q (kVAr) at bus q
28 - 29	0.80420	0.70060	300.00	175.00
29 - 30	0.50750	0.25850	500.00	1500.00
30 - 31	0.97440	0.96300	375.00	175.00
31 - 32	0.31050	0.36190	525.00	250.00
32 - 33	0.34100	0.53020	150.00	100.00

หมายเหตุ ในการคำนวณจะกำหนดให้บัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง (Reference Bus)

ค่า Base kV = 23 ค่า Base kVA = 5750 ค่า Base Impedance = 92 Ω

Total Active Power = 9287.5 kW Total Reactive Power = 5750 kVAr

(ก) กรณีผลการติดตั้งเฉพาะตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก

การทดสอบจะสมมติให้ระบบจำหน่ายมีการกระจายของโหลดในหนึ่งปี ดังตารางที่ 5-11 สำหรับราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุจะใช้ราคาที่แสดงไว้ในตารางที่ 5-7 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5-12 โดยมีขอบเขตแรงดันสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 1.05 และ 0.95 p.u.

ตารางที่ 5-11 การกระจายของโหลดของระบบ 33 บัส กรณี(ก)

ระดับโหลด (%)	40	60	80	100
ระยะเวลา (ชม.)	1000	3000	4260	500
ราคาพลังงานสูญเสีย (Ke)	0.75	0.75	0.75	0.75

ตารางที่ 5-12 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 33 บัส กรณี(ก)

ตำแหน่งติดตั้ง ตัวเก็บประจุ	ระดับโหลด			
	40 %	60 %	80 %	100 %
บัส 15	-	-	S 600	S 600
บัส 30	-	-	S 900	S 900
บัส 32	-	S 600	S 600	S 600

จากผลในตารางที่ 5-12 ประเภทของตัวเก็บประจุที่ติดตั้งมีเฉพาะแบบสับเข้า-ปลดออกเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาของการเกิดโหนดระดับ 40% มีค่าน้อย (1000 ชม.) ทำให้ค่าใช้จ่ายเนื่องจากพลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าต่ำ ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่ระดับโหนดนี้ จึงไม่เหมาะสม ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกำลังงานสูญเสียรวมของระบบทั้งก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของโหนดแต่ละระดับแสดงในตารางที่ 5-13

ตารางที่ 5-13 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกำลังงานสูญเสียของระบบ 33 บัส กรณี (ก)

ระดับโหนด	60 %		80 %		100 %	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
ลำดับการติดตั้ง						
V_{max} p.u.	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
V_{min} p.u.	0.96227	0.96397	0.95018	0.96099	0.94603	0.95010
Payment Cost (B)	269640.0	263972.5	682356.2	574090.6	137407.5	93746.25
Total Loss (kW)	119.84	102.21	213.57	153.08	366.42	249.99
Loss Reduce (kW)	17.63		60.49		116.43	

ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ของโหนดแต่ละระดับในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข

(ข) กรณีผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบผสม

เนื่องจากวิธีแก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะเริ่มพิจารณาที่ระดับโหนดต่ำสุดก่อน ดังนั้นระยะเวลาของการเกิดโหนดที่ระดับต่ำสุด จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวร ดังตัวอย่างในการทดสอบของกรณีนี้ ถ้ากำหนดให้การกระจายของโหนดเป็นดังตารางที่ 5-14 ซึ่งจะเห็นว่าระยะเวลาที่เกิดของโหนดระดับ 40% สูงถึง 2500 ชม. ทำให้ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นดังตารางที่ 5-15

ตารางที่ 5-14 การกระจายของโหนดของระบบ 33 บัส กรณี(ข)

ระดับโหนด (%)	40	60	80	100
ระยะเวลา (ชม.)	2500	2500	2760	1000
ราคาพลังงานสูญเสีย (Ke)	0.75	0.75	0.75	0.75

ตารางที่ 5-15 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 33 บัส กรณี(ข)

ตำแหน่งติดตั้ง ตัวเก็บประจุ	ระดับโหลด			
	40 %	60 %	80 %	100 %
บัส 31	-	-	S 600	S 600
บัส 30	F 600	F 600	F 600	F 600

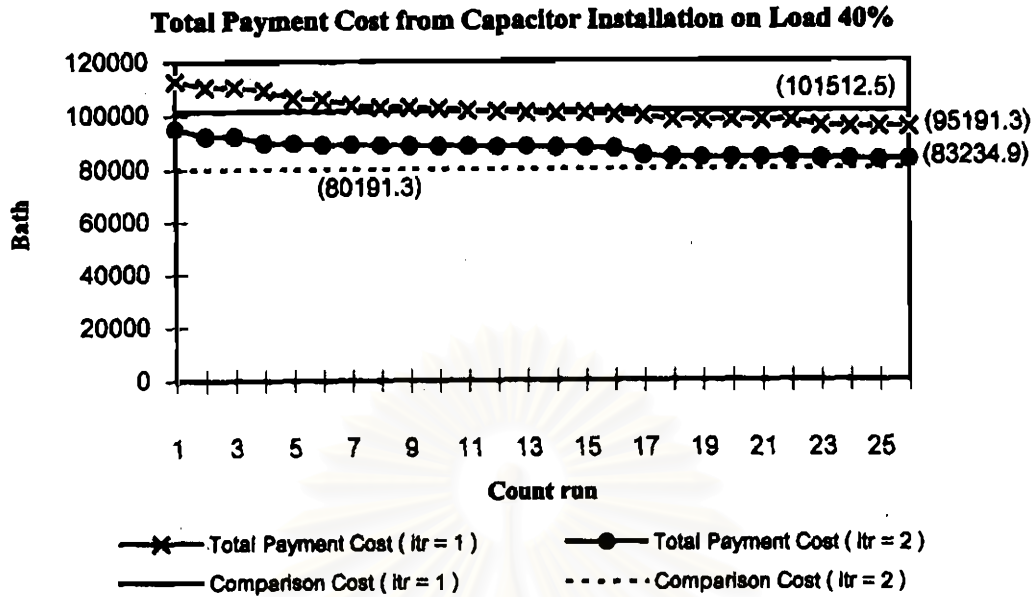
ผลการทดสอบพบว่า ต้องติดตั้งตัวเก็บประจุแบบดาว ขนาด 600 kVAr ที่บัส 30 และติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก ขนาด 600 kVAr ที่บัส 31 โดยเริ่มสับตัวเก็บประจุเข้ากับระบบที่ระดับโหลด 80% ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกำลังงานสูญเสียรวมของระบบทั้งก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ แสดงดังตารางที่ 5-16

ตารางที่ 5-16 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกำลังงานสูญเสียของระบบ 33 บัส กรณี(ข)

ระดับโหลด	40 %		60 %		80 %		100 %	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
V_{max} p.u.	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
V_{min} p.u.	0.97509	0.97674	0.96227	0.96396	0.95018	0.95264	0.94603	0.95000
Payment Cost (B)	101512.5	95191.3	224700.0	192168.7	442089.9	387578.4	274815.0	207832.5
Total Loss (kW)	54.14	42.77	119.84	102.49	213.57	170.81	366.42	277.11
Loss Reduce (kW)	11.37		17.35		42.76		89.31	

ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบทดสอบ 33 บัส กรณี(ข) ในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลดต่างๆ สามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข

รูปที่ 5-24 ถึง 5-27 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุกับค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบของระดับโหลด 40-100% ตามลำดับ โดยในการคำนวณ จะเลือกพิจารณา กลุ่มของบัสที่มีค่าเช่นซิวิตีแฟกเตอร์สูงสุดจำนวน 13 บัส เพื่อนำมาทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุ และพิจารณาเฉพาะกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดันเท่านั้น



รูปที่ 5-24 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 40% ของระบบ 33 บัส กรณี (ข)

จากรูปที่ 5-24 จำนวนรอบในการคำนวณมีทั้งหมด 2 รอบ โดย

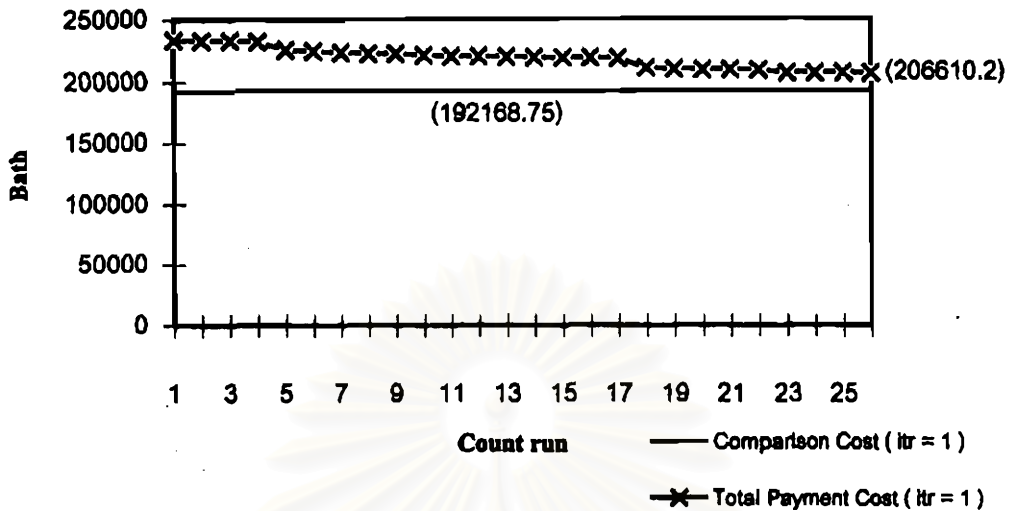
การคำนวณรอบแรก (Iteration = 1)

ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังงานสูญเสียของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 101,512.50 บาท ผลการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรในการคำนวณรอบแรก ตามราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุที่แสดงไว้ในตารางที่ 5-7 ได้ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 600 kVAr ที่บัส 30 โดยเสียค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 95,191.30 บาท

การคำนวณรอบที่สอง (Iteration = 2)

ค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 80,191.30 บาท (95,191.3-15,000) การทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรในรอบที่สองไม่พบกรณีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า 80,191.30 ดังนั้นที่ระดับโหลด 40% จึงติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรเพียงตัวเดียวเท่านั้น

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 60%



รูปที่ 5-25 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 60% ของระบบ 33 บั๊ต กรณี (ข)

จากรูปที่ 5-25 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บแบบถาวรขนาด 600 kVA_r ที่บั๊ต 30 (ตามผลในตารางที่ 5-15) แต่ไม่รวมราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุดังกล่าว คิดเป็นเงินเท่ากับ 192,168.75 บาท ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดันพบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 60%

จากรูปที่ 5-26 จำนวนรอบในการคำนวณทั้งหมด 2 รอบ โดย

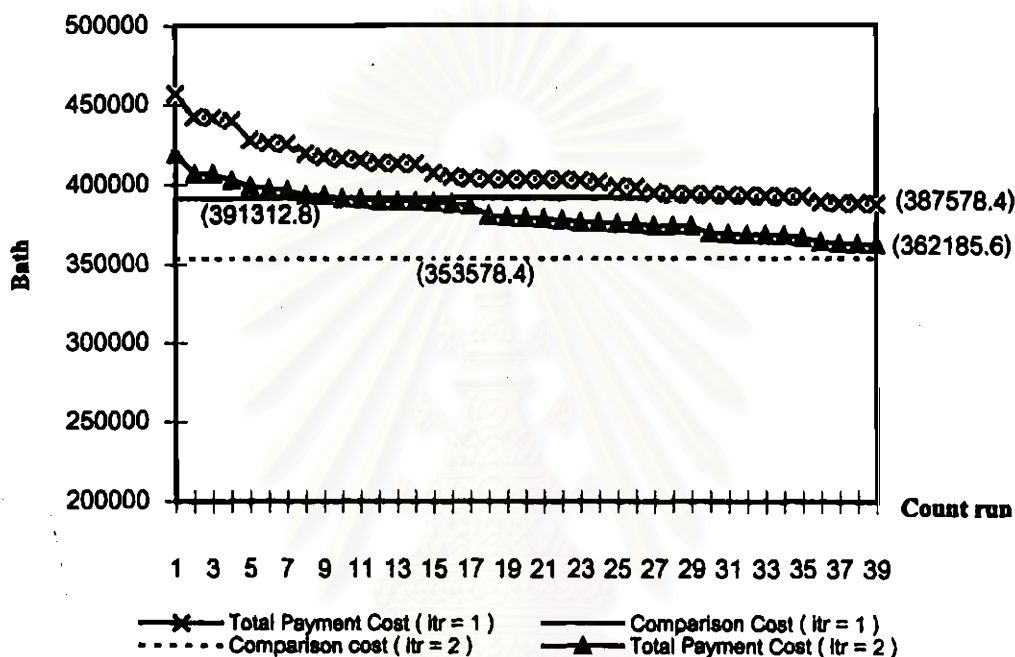
การคำนวณรอบแรก (Iteration = 1)

ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่บั๊ต 30 (ตามผลในตารางที่ 5-15) แต่ไม่รวมราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 391,312.80 บาท ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน พบกรณีที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดเท่ากับ 387,578.40 บาท โดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก ขนาด 600 kVA_r ที่บั๊ต 31

การคำนวณรอบที่สอง (Iteration = 2)

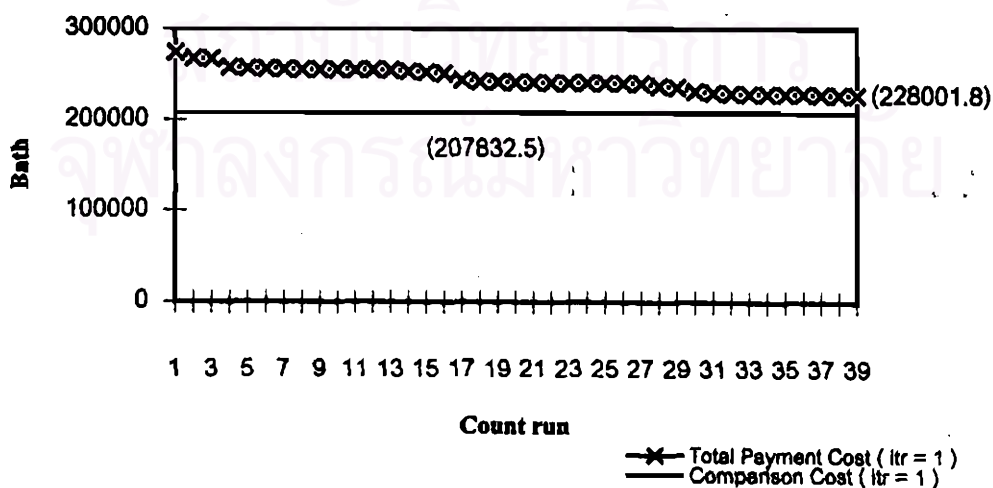
ค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 353,578.40 บาท (387,578.40-34,000) การทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกในรอบที่สองไม่พบกรณีที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่า 353,578.40 บาท ดังนั้นที่ระดับโหลด 80% จึงติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกเพิ่มเพียงตัวเดียวเท่านั้น

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 80%



รูปที่ 5-26 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 80% ของระบบ 33 บัส กรณี (ข)

Total Payment Cost from Capacitor Installation on Load 100%



รูปที่ 5-27 ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 33 บัส กรณี (ข)

ในลักษณะเดียวกัน ที่ระดับโหลด 100% (รูปที่ 5-27) ค่าใช้จ่ายเนื่องจากกำลังสูญเสียของระบบโดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่บัส 30 และแบบสับเข้า-ปลดออก ที่บัส 31 แต่ไม่รวมราคาสินค้าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุ คิดเป็นเงินเท่ากับ 207,832.50 บาท ซึ่งใช้เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบในการคำนวณรอบแรก จากการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุโดยเลือกกรณีที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดัน พบว่าไม่มีกรณีใดที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำกว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเปรียบเทียบดังกล่าว ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มที่ระดับโหลด 100%

จากผลการทดสอบทั้ง 2 กรณี จะเห็นได้ว่าการกำหนดระยะเวลาของการเกิดโหลดที่ระดับต่ำสุด จะเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้ประเภทของการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ได้แตกต่างกัน

5.4.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก จะพิจารณาระบบจำหน่ายขนาด 19 บัส ที่ได้ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1800 kVAr จำนวนหนึ่งตัวที่บัส 19 (ตามตารางที่ 5-5) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

(ก) กรณีมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นตำแหน่งเดียว

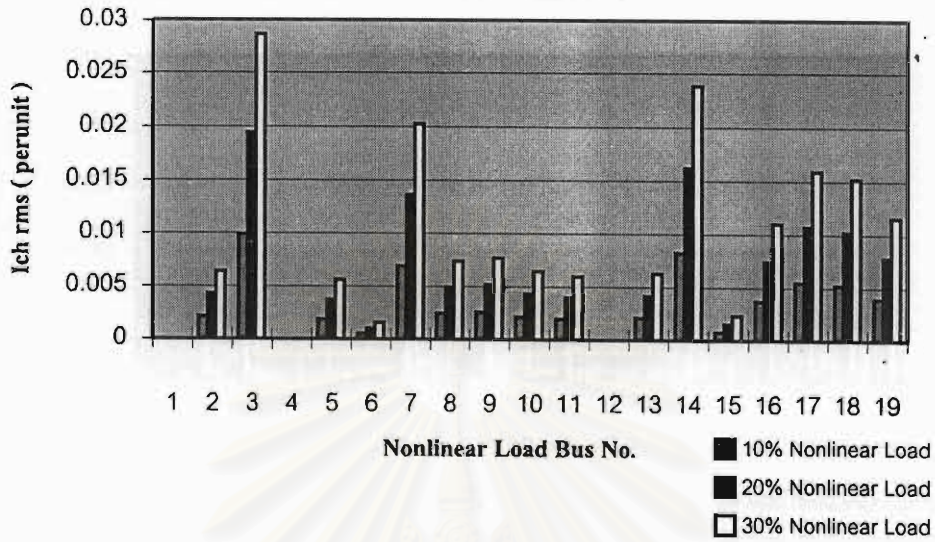
ในกรณีนี้จะพิจารณาให้มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น และทำการเปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Current) ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($I_{Ch rms}$) โดยการย้ายตำแหน่งของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นไปยังบัสต่างๆ รวมถึงการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (% Nonlinear Load) ให้มีค่าต่างๆ กันด้วย

ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 5-17 โดยจะพิจารณาเฉพาะความถี่ตั้งแต่ลำดับ 3 ถึง 25 เท่านั้น (THD_i ของโหลด = 47.44 %)

ตารางที่ 5-17 กระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

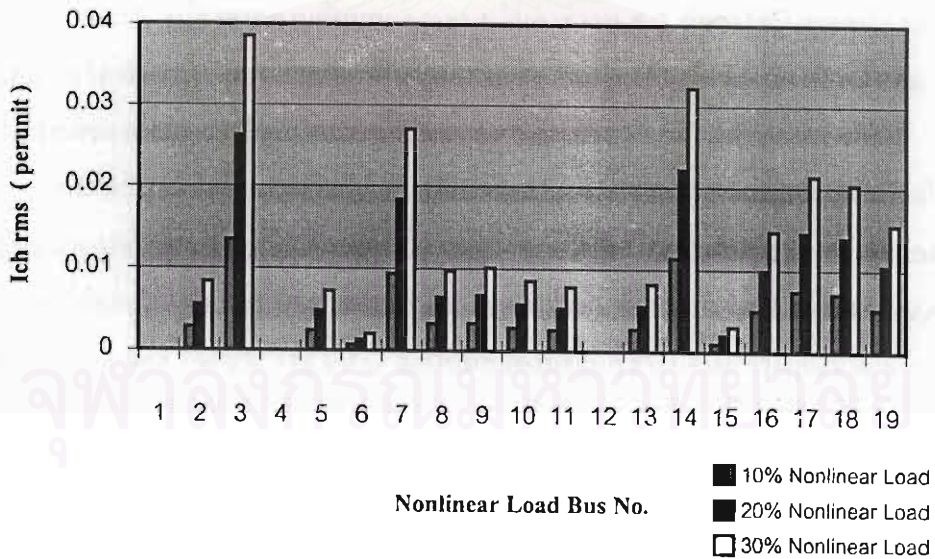
Order	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
THD _i	5.0	40.0	20.0	3.0	9.0	7.7	2.0	5.0	4.5	1.5	4.0	3.0

**Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 70%**



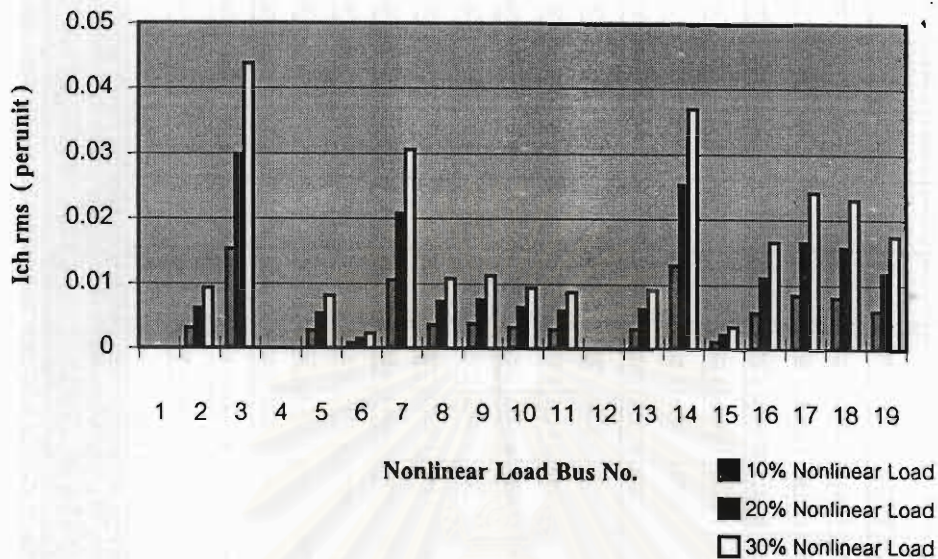
รูปที่ 5-28 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70%

**Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 90%**



รูปที่ 5-29 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90%

**Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 100%**



รูปที่ 5-30 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100%

จากรูปที่ 5-28 ถึง 5-30 แสดงค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ที่ต่ออยู่ที่บัส 19 จากการกำหนดให้มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ละบัสจนครบทุกบัส ยกเว้นบัสที่ 1, 4 และ บัส 12 เนื่องจากตามข้อมูลของระบบในตารางที่ 5-2 ถือว่าไม่มีโหลดที่บัสดังกล่าว ในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นตั้งแต่ 10%-30% เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

จากผลลัพธ์ที่ได้ยังสรุปไม่ได้ว่า ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นว่าอยู่ไกลหรือใกล้กับตัวเก็บประจุ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของโหลดที่ต่ออยู่ที่แต่ละบัส มีขนาดไม่เท่ากัน เช่น ที่บัส 3 มีขนาด 2720 kW 2380 kVAr แต่ที่บัส 6 มีขนาดโหลดเพียง 156 kW 136 kVAr ดังนั้นผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จึงมีขนาดต่างกันอย่างมาก ดังที่ปรากฏในรูปที่ 5-28 ถึง 5-30

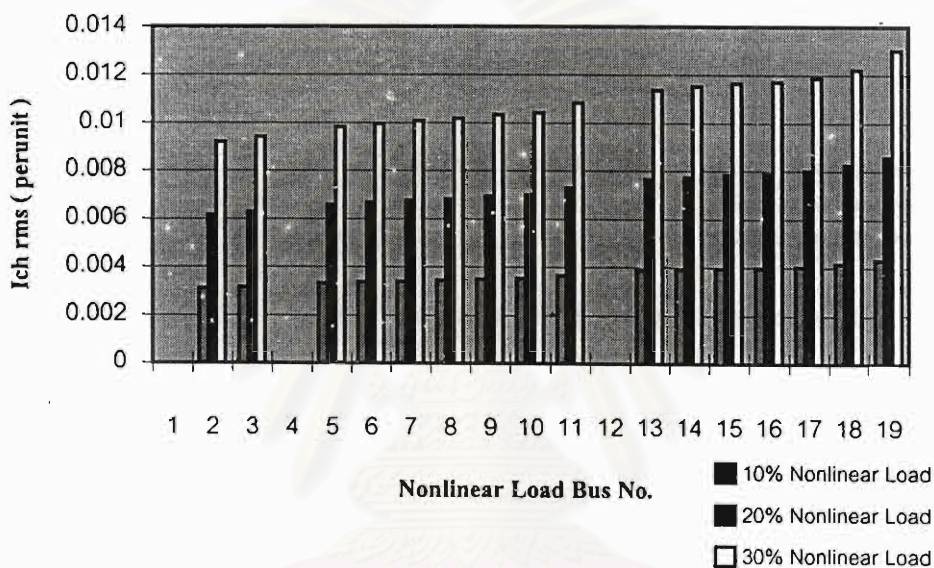
ตารางที่ 5-18 แสดงค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดันแต่ละบัส และค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่บัส 19 ที่ระดับโหลด 100% โดยเลือกเฉพาะกรณีของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นต่ออยู่ที่บัสที่มีการใช้โหลดเชิงเส้นสูงๆ

ตารางที่ 5-18 ระดับ THDv ที่บัสต่างๆ (ที่ระดับโหลด 100%)

Non-linear Load bus No.	% Non-linear Load	% THDv at bus No.																			%THDv of Cap at Bus 19
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
3	10	0.5728	0.9238	0.9428	0.9491	0.9837	0.9963	1.0089	1.0167	1.0324	1.0402	1.0798	1.1165	1.1293	1.1420	1.1547	1.1595	1.1753	1.2066	1.2143	12.3707
	20	1.1308	1.8239	1.8613	1.8735	1.9405	1.9650	1.9895	2.0046	2.0351	2.0502	2.1270	2.1981	2.2229	2.2477	2.2722	2.2816	2.3122	2.3731	2.3880	24.1698
	30	1.6737	2.6995	2.7548	2.7725	2.8697	2.9052	2.9408	2.9626	3.0069	3.0288	3.1402	3.2435	3.2795	3.3155	3.3511	3.3647	3.4092	3.4976	3.5193	35.3612
7	10	0.4053	0.6537	0.6671	0.6716	0.6958	0.7046	0.7133	0.7186	0.7294	0.7347	0.7617	0.7868	0.7956	0.8043	0.8129	0.8162	0.8270	0.8485	0.8538	8.5816
	20	0.8014	1.2926	1.3190	1.3278	1.3757	1.3930	1.4104	1.4207	1.4416	1.4520	1.5046	1.5535	1.5705	1.5876	1.6044	1.6108	1.6318	1.6737	1.6839	16.8228
	30	1.1885	1.9169	1.9562	1.9692	2.0402	2.0659	2.0917	2.1067	2.1373	2.1523	2.2292	2.3004	2.3253	2.3502	2.3747	2.3841	2.4148	2.4759	2.4908	24.7208
14	10	0.4875	0.7863	0.8024	0.8077	0.8369	0.8474	0.8580	0.8644	0.8774	0.8838	0.9163	0.9461	0.9564	0.9667	0.9775	0.9816	0.9951	1.0218	1.0284	10.5119
	20	0.9558	1.5415	1.5730	1.5835	1.6406	1.6613	1.6820	1.6946	1.7201	1.7327	1.7963	1.8548	1.8750	1.8952	1.9160	1.9240	1.9500	2.0017	2.0143	20.4503
	30	1.4049	2.2659	2.3123	2.3277	2.4117	2.4421	2.4724	2.4910	2.5286	2.5470	2.6406	2.7265	2.7563	2.7860	2.8160	2.8275	2.8651	2.9399	2.9582	29.8075
16	10	0.2205	0.3557	0.3630	0.3654	0.3786	0.3834	0.3881	0.3910	0.3969	0.3998	0.4145	0.4280	0.4327	0.4373	0.4419	0.4437	0.4493	0.4605	0.4633	4.5669
	20	0.4372	0.7052	0.7196	0.7244	0.7506	0.7600	0.7695	0.7752	0.7869	0.7927	0.8218	0.8485	0.8578	0.8670	0.8761	0.8796	0.8907	0.9127	0.9180	9.0064
	30	0.6503	1.0489	1.0704	1.0775	1.1164	1.1305	1.1445	1.1531	1.1705	1.1791	1.2224	1.2621	1.2759	1.2897	1.3032	1.3084	1.3246	1.3570	1.3649	13.3235
17	10	0.3222	0.5197	0.5303	0.5339	0.5531	0.5601	0.5671	0.5713	0.5799	0.5842	0.6056	0.6253	0.6322	0.6390	0.6457	0.6482	0.6566	0.6736	0.6777	6.7976
	20	0.6351	1.0242	1.0452	1.0522	1.0901	1.1039	1.1176	1.1260	1.1430	1.1513	1.1936	1.2325	1.2459	1.2593	1.2726	1.2776	1.2940	1.3271	1.3352	13.3098
	30	0.9394	1.5150	1.5461	1.5563	1.6125	1.6328	1.6531	1.6656	1.6907	1.7030	1.7656	1.8230	1.8429	1.8628	1.8823	1.8898	1.9141	1.9623	1.9741	19.5521
18	10	0.3079	0.4965	0.5067	0.5100	0.5284	0.5351	0.5418	0.5458	0.5541	0.5581	0.5786	0.5974	0.6039	0.6105	0.6169	0.6193	0.6273	0.6431	0.6470	6.4836
	20	0.6067	0.9785	0.9985	1.0052	1.0414	1.0546	1.0677	1.0757	1.0919	1.0999	1.1403	1.1774	1.1903	1.2031	1.2157	1.2205	1.2362	1.2673	1.2751	12.6993
	30	0.8972	1.4470	1.4767	1.4865	1.5401	1.5595	1.5790	1.5908	1.6148	1.6266	1.6863	1.7412	1.7602	1.7792	1.7979	1.8050	1.8282	1.8742	1.8855	18.6589
19	10	0.2327	0.3753	0.3830	0.3855	0.3995	0.4045	0.4095	0.4126	0.4188	0.4219	0.4374	0.4516	0.4565	0.4614	0.4663	0.4681	0.4742	0.4861	0.4890	4.8408
	20	0.4604	0.7425	0.7578	0.7628	0.7903	0.8003	0.8102	0.8163	0.8286	0.8347	0.8653	0.8935	0.9032	0.9130	0.9226	0.9262	0.9381	0.9617	0.9675	9.5276
	30	0.6835	1.1024	1.1250	1.1325	1.1734	1.1881	1.2029	1.2120	1.2302	1.2392	1.2847	1.3265	1.3410	1.3555	1.3697	1.3751	1.3928	1.4279	1.4364	14.0692

เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ กับตำแหน่งของโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้ทำการปรับขนาดโหลดที่แต่ละบัสให้มีค่าเท่ากันทุกบัส โดยใช้โหลดเฉลี่ย 930.75 kW และ 868.50 kVAr เพื่อวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จะได้ผลลัพธ์ ดังรูปที่ 5-31 ถึง 5-33

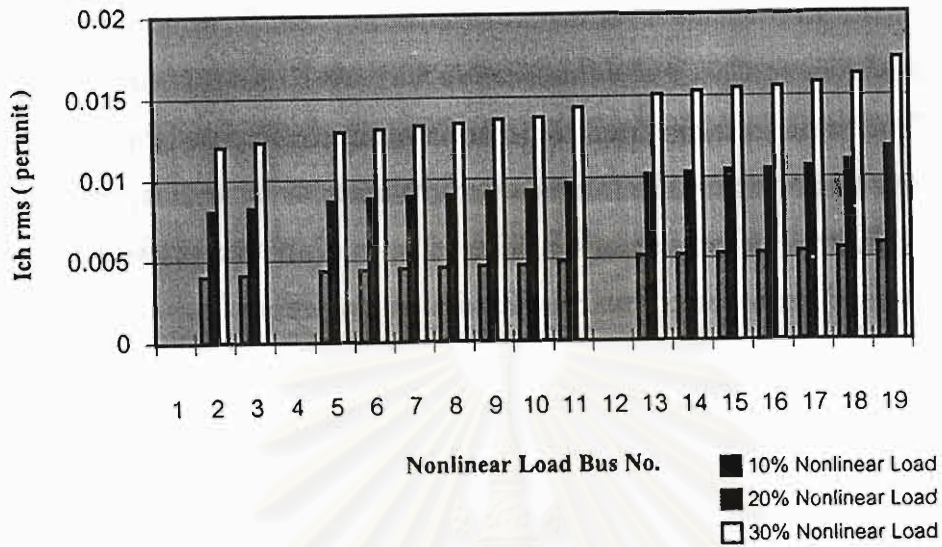
Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 70%



รูปที่ 5-31 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับ โหลดที่ระดับโหลด 70%

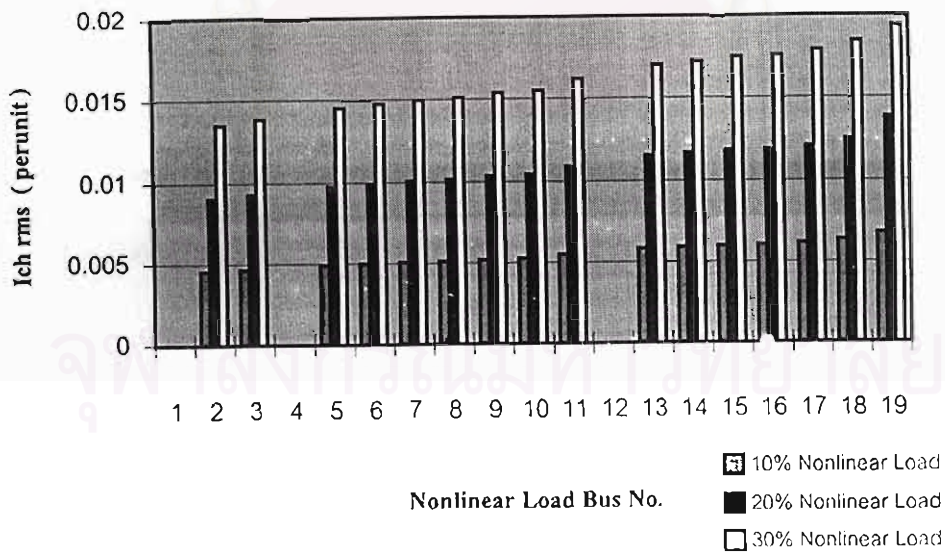
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 90%**



รูปที่ 5-32 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับโหลดที่ระดับโหลด 90%

**Total Harmonic Current Flow Through Capacitor 1800 kVAr at
Bus 19 on Load 100%**



รูปที่ 5-33 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับโหลดที่ระดับโหลด 100%

จากรูปที่ 5-31 ถึง 5-33 สามารถสรุปได้ว่าถ้ากำหนดขนาดของโหลดที่ต่ออยู่ที่บัส ให้มีค่าเท่ากันทุกบัสแล้ว ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ที่ต่ออยู่ที่บัส 19 จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ ถ้าตำแหน่งของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ใกล้กับตัวเก็บประจุ จะส่งผลทำให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่ามาก ในทางตรงข้าม ถ้าตำแหน่งของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ไกลจากตัวเก็บประจุ ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าน้อยลง อีกทั้งปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะสังเกตได้จากการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นด้วย และในลักษณะเช่นเดียวกันปริมาณกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้นตามระดับโหลดที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

(ข) กรณีมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง

จากการทดสอบในกรณีแรก ซึ่งกำหนดให้มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเพียงตำแหน่งเดียว ค่ากระแส rms (รวมผลของกระแสฮาร์มอนิก) ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุยังมีค่าน้อย ดังนั้นการทดสอบในกรณีนี้ จะกำหนดให้มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง เพื่อประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ที่ต่ออยู่ที่บัส 19 จากการที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นในระบบ ตำแหน่งโหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5-19

ตารางที่ 5-19 ตำแหน่งและค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

Nonlinear Load Bus		3	7	14	16	17	19
% of Nonlinear Load		30	40	30	25	35	-
Linear Load	kW	2,720	1,840	1,776	864	1,200	864
	kVAr	2,380	1,612	1,716	836	1,160	836

ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทุกบัสกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังตารางที่ 5-17 ผลการคำนวณค่าพิกัดของตัวเก็บประจุเทียบกับค่าพิกัดที่กำหนดตามมาตรฐานที่ระดับโหลดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5-20 ถึง 5-22

ตารางที่ 5-20 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐานที่ระดับโหลด 70%

Item	Calculated (%)	ANSI/IEEE limit (%)	IEC limit (%)
Peak Voltage	120.2227	< 120	< 120
rms Voltage	100.4899	< 110	< 110
rms Current	144.4062	< 180	< 130
kVAr	145.1137	< 135	-

(THD_i of Capacitor at Bus 19 = 104.178 %)

ตารางที่ 5-21 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐานที่ระดับโหลด 90%

Item	Calculated (%)	ANSI/IEEE limit (%)	IEC limit (%)
Peak Voltage	124.3456	< 120	< 120
rms Voltage	100.6400	< 110	< 110
rms Current	155.5837	< 180	< 130
kVAr	156.5794	< 135	-

(THD_i of Capacitor at Bus 19 = 119.190 %)

ตารางที่ 5-22 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐานที่ระดับโหลด 100%

Item	Calculated (%)	ANSI/IEEE limit (%)	IEC limit (%)
Peak Voltage	126.0451	< 120	< 120
rms Voltage	100.6882	< 110	< 110
rms Current	159.0732	< 180	< 130
kVAr	160.1680	< 135	-

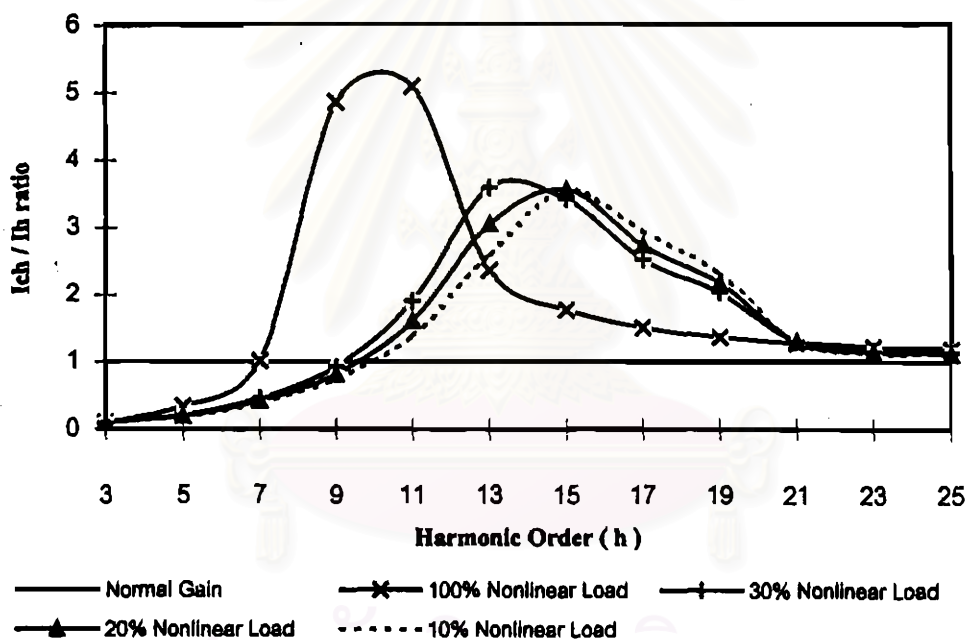
(THD_i of Capacitor at Bus 19 = 123.710 %)

จากผลการทดสอบพบว่า ตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายที่โหลดทุกระดับ และสามารถสรุปได้ว่า การมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบจำหน่ายจำนวนมาก อาจทำให้เกิดความเสียหายกับตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งอยู่ในระบบได้ เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นไหลผ่านตัวเก็บประจุในปริมาณที่สูงเกิน

5.4.4 การวิเคราะห์ผลของเรโซแนนซ์

จากระบบทดสอบ 19 บัส ที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr อยู่ที่บัส 19 เราสามารถวิเคราะห์ผลของเรโซแนนซ์ เพื่อหาลำดับความถี่ฮาร์มอนิกที่ทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (I_{ch}) กับกระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (I_h) มีค่าสูงสุดได้ โดยการกำหนดให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นถูกต่ออยู่ที่บัส 19 เพียงบัสเดียว โดยให้กระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นยังมีค่าดังตารางที่ 5-17 และกำหนดเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 10% , 20% , 30% และ 100%

Resonance Point of Capacitor 1800 kVAr at Bus 19



รูปที่ 5-34 ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ของระบบ 19 บัส

จากผลการคำนวณพบว่า การเกิดเรโซแนนซ์กรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่า 100% จะเริ่มจากลำดับความถี่ฮาร์มอนิกที่ 7 แต่ผลของเรโซแนนซ์ที่ทำให้อัตราขยาย (I_{ch} / I_h) มีค่าสูงสุด อยู่ใน ช่วงลำดับความถี่ฮาร์มอนิกที่ 9 - 11 แต่สำหรับกรณีที่เปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าลดลง จะทำให้ความรุนแรงของการเกิดเรโซแนนซ์ลดลงด้วย รวมถึงจุดเรโซแนนซ์ก็จะเปลี่ยนไปโดยเลื่อนออกไปยังความถี่ฮาร์มอนิกที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5-34 ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่เปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าต่ำกว่า 100% จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นมีอิทธิพลในการลดความรุนแรง (Damp) ของเรโซแนนซ์ได้

5.5 สรุป

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานบนสายป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่ายได้ รวมถึงการประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุ จากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นของระบบจำหน่ายในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย