

## บทที่ 7

### การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย

#### 7.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายสมดุล

##### 7.1.1 บทนำ

กำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตถูกส่งมายังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านระบบส่งและระบบจำหน่าย โดยมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายประมาณร้อยละ 5-13 ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นทั้งหมด (Ng, Salama and Chikhani, 2000a) กำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเท่ากับผลคูณของค่ายกกำลังสองของกระแสที่ไหลในสายป้อนกับความต้านทานสายป้อน เมื่อต้องการลดค่ากำลังสูญเสีย ก็ต้องทำให้กระแสในสายป้อนและความต้านทานสายป้อนมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม การปรับลดค่าความต้านทานของสายป้อนเป็นสิ่งซึ่งทำได้ยาก เพราะเกี่ยวข้องกับการแก้ไขลักษณะทางกายภาพของสายป้อน (เช่น การเพิ่มขนาดสาย การเปลี่ยนชนิดของสาย) ด้วยเหตุนี้ แนวทางที่เหมาะสมในการลดค่ากำลังสูญเสีย คือ การทำให้กระแสในสายป้อนมีค่าน้อยลง

วิธีหนึ่งซึ่งใช้ลดค่ากระแสในสายป้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ การติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่โหลดต้องการจากระบบ กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุทำให้กระแสส่วนที่เป็นกระแสรีแอกทีฟซึ่งโหลดต้องใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าน้อยลง เมื่อปริมาณกระแสรีแอกทีฟในสายป้อนมีค่าต่ำลง กระแสรวมที่ไหลในสายป้อนก็จะลดลง และนำไปสู่การลดค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

ประโยชน์อื่นๆ ที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุ คือ การควบคุมขนาดแรงดันบัส การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ รวมทั้งช่วยให้สายป้อนและระบบจำหน่ายสามารถรองรับโหลดได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นไปอย่างเหมาะสมทั้งในแง่ของตำแหน่งติดตั้ง ขนาด และชนิดของตัวเก็บประจุ การวางแผนเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุในสายป้อนต้องพิจารณาถึงประโยชน์ที่ได้รับ ความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลด ปริมาณโหลดซึ่งเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา รวมถึงเงินลงทุนสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุ

เนื้อหาในหัวข้อนี้กล่าวถึงการใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อกำหนดแนวทางการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายสมดุลซึ่งมีโหลดไม่เชิงเส้น ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งคัดแปลงจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

### 7.1.2 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของการติดตั้งตัวเก็บประจุมิราละเอียดตามสมการที่ (7-1) ซึ่งเป็นผลรวมของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลดในระยะเวลาหนึ่งปี ค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุด และเงินลงทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งชนิดค่าคงที่และชนิดปรับค่าได้

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S (k_e^j T^j P_L^j) + k_p P_L^P + \left( \sum_{k \in \text{NCf}} k_{cf} Qc_k^f + \sum_{k \in \text{NCs}} k_{cs} Qc_k^s \right) \quad (7-1)$$

การศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เชิงเส้นซึ่งต่ออยู่ในระบบกำลังไฟฟ้าสูญเสียจึงมีค่าเท่ากับ

$$P_L^j = \sum_{h=1}^{nh} P_L^{h,j} \quad (7-2)$$

เงื่อนไขบังคับ ได้แก่ สมการสมมูลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในแต่ละบัส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (7-3)$$

$$Q_i^j = -\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} |V_i^j V_n^j Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (7-4)$$

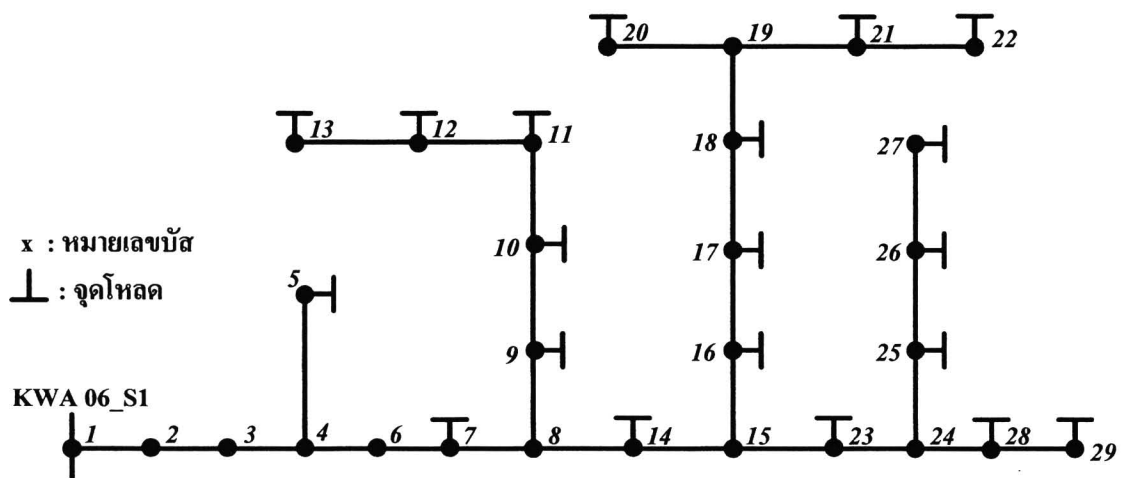
$$V^{\min} \leq \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_i^{h,j}|^2} \leq V^{\max} \quad (7-5)$$

$$\text{THD}_{V,i}^j \leq \text{THD}_V^{\max} \quad (7-6)$$

$$Qc_k^j \leq Qc^{\max} \quad \text{where } k \in \text{NC} \quad (7-7)$$

### 7.1.3 ข้อมูลแบบจำลองระบบจำหน่าย

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากวงจรสายป้อน KWA06 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สมชาย, 2549) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06\_S1 โครงสร้างของระบบมีลักษณะตามภาพที่ 7-1 ข้อมูลสายป้อนเป็นข้อมูลเดิมของระบบตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 7-1 ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดได้ถูกดัดแปลงให้มีค่าตามตารางที่ 7-2 ในขณะที่ความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้คำนวณจากค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสนั้น โดยใช้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 แบบล่าหลัง (Lagging)



ภาพที่ 7-1 ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06\_S1

### 7.1.4 ข้อมูลการคำนวณ

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 22 kV และ 100 MVA กำหนดให้แรงดันที่บัสอ้างอิงมีขนาดเท่ากับ 1.0 pu ระดับโหลดแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับสูงตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 7-3 โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางมีค่าเท่ากับความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด ส่วนอันดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา ได้แก่ อันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25

ตารางที่ 7-1 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06\_S1

หมายเลขบัส ปลายด้านส่ง	หมายเลขบัส ปลายด้านรับ	ความยาว (km)	ชนิด ของสาย	หมายเลขบัส ปลายด้านส่ง	หมายเลขบัส ปลายด้านรับ	ความยาว (km)	ชนิด ของสาย
1	2	8.740	SAC185	15	16	0.312	ACSR50
2	3	0.383	SAC185	16	17	0.051	ACSR50
3	4	0.429	SAC185	17	18	0.466	ACSR50
4	5	0.289	SAC185	18	19	0.091	ACSR50
4	6	3.006	SAC185	19	20	0.410	ACSR50
6	7	0.190	ACSR50	19	21	0.166	ACSR50
7	8	1.069	ACSR50	21	22	0.319	ACSR50
8	9	0.854	ACSR50	15	23	0.505	ACSR50
9	10	0.017	ACSR50	23	24	0.130	ACSR50
10	11	0.222	ACSR50	24	25	0.394	ACSR50
11	12	0.518	ACSR50	25	26	0.693	ACSR50
12	13	0.081	ACSR50	26	27	0.430	ACSR50
8	14	0.508	ACSR50	24	28	0.291	ACSR50
14	15	0.064	ACSR50	28	29	0.091	ACSR50

ตารางที่ 7-2 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06\_S1

หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	ร้อยละความ ไม่เป็นเชิงเส้น	หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	ร้อยละความ ไม่เป็นเชิงเส้น
1	-	-	16	125	30
2	-	-	17	180	30
3	-	-	18	145	30
4	-	-	19	-	-
5	400	70	20	100	30
6	-	-	21	130	30
7	310	70	22	100	30
8	-	-	23	290	70
9	400	70	24	-	-
10	85	30	25	100	30
11	425	70	26	150	30
12	175	30	27	150	30
13	240	30	28	125	30
14	100	30	29	160	30
15	-	-			



ตารางที่ 7-3 ข้อมูลระดับโหลดสำหรับแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06\_S1

ระดับโหลด	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 ปี (ชั่วโมง)
ต่ำ	0.8	2,628
ปานกลาง	1.0	4,818
สูง	1.3	1,314

$k_e^j$  ที่ใช้คำนวณมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าเท่ากับ 1.1154 บาท/kWh ในช่วงระดับโหลดต่ำและระดับโหลดปานกลาง และเท่ากับ 2.9278 บาท/kWh ในช่วงระดับโหลดสูง ค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงระดับโหลดสูงสุดมีค่าเป็นศูนย์ ( $k_p = 0$ ) เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่ต้องรับภาระค่าใช้จ่ายส่วนนี้จากการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุสำหรับการติดตั้งในแต่ละชั้น คือ 150 kVAr โดย  $k_{cf}$  ของการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 18,000 บาท/ชั้น และ  $k_{cs}$  ของการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้มีค่าเท่ากับ 27,000 บาท/ชั้น

สำหรับเงื่อนไขบังคับ กำหนดให้  $V^{\min}$  และ  $V^{\max}$  เท่ากับ 0.95 pu และ 1.05 pu ส่วนค่าของ  $THD_V^{\max}$  และ  $Q_c^{\max}$  คือ 5% และ 900 kVAr

#### 7.1.5 พารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

สำหรับพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย ได้กำหนดให้อนุภาคในกลุ่มประกอบด้วย 100 อนุภาค และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 150 รอบ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 30 รอบการคำนวณ ความเร็วของอนุภาคเมื่อไม่มีการกระตุ้น ให้คำนวณจาก

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 r_{1d}^t (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_{2d}^t (gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (7-8)$$

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน  $c_1$  และ  $c_2$  มีค่าเท่ากับ 2.0

#### 7.1.6 กรณีศึกษาที่พิจารณา

กรณีศึกษาที่พิจารณาประกอบด้วย 3 กรณี ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1: ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ กรณีศึกษาที่ 2: ติดตั้งตัวเก็บประจุโดยไม่นำค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมาเป็นเงื่อนไขบังคับ และกรณีศึกษาที่ 3: ติดตั้งตัวเก็บประจุโดยนำค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมาเป็นเงื่อนไขบังคับ

การติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 ได้พิจารณาเป็นปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ Type C โดยผลเฉลยจากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวต้องแสดงข้อมูลของจำนวนตัวเก็บประจุและตำแหน่งติดตั้ง รวมทั้งค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุเหล่านั้น ณ ระดับโหลดต่างๆ

#### 7.1.7 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

ผลเฉลยสำหรับการติดตั้งตัวเก็บในประจุในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 มีรายละเอียดตามตารางที่ 7-4 และตารางที่ 7-5 ผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งตัวเก็บประจุได้แสดงไว้ในตารางที่ 7-6 การเปรียบเทียบเทียบขนาดแรงดันบัส และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในทุกระดับโหลดได้แสดงไว้ในภาพที่ 7-2 ถึงภาพที่ 7-7

ตารางที่ 7-4 ผลเฉลยสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2

หมายเลข บัส	กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด (kVAr)			ขนาดตัวเก็บประจุ ที่ติดตั้ง (kVAr)	ชนิดตัวเก็บประจุ
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง		
11	600	600	600	600	ชนิดค่าคงที่
12	600	600	750	750	ชนิดปรับค่าได้
18	450	450	600	600	ชนิดปรับค่าได้
20	300	600	900	900	ชนิดปรับค่าได้
25	600	600	600	600	ชนิดค่าคงที่

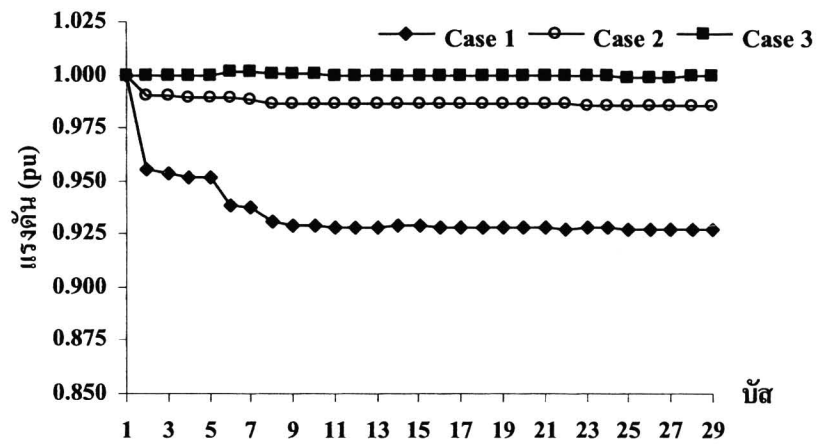
ตารางที่ 7-5 ผลเฉลยสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 3

หมายเลข บัส	กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด (kVAr)			ขนาดตัวเก็บประจุ ที่ติดตั้ง (kVAr)	ชนิดตัวเก็บประจุ
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง		
7	150	450	750	750	ชนิดปรับค่าได้
9	600	600	600	600	ชนิดค่าคงที่
10	750	750	750	750	ชนิดค่าคงที่
11	150	600	600	600	ชนิดปรับค่าได้
14	450	450	450	450	ชนิดค่าคงที่
21	600	600	600	600	ชนิดค่าคงที่
24	300	300	450	450	ชนิดปรับค่าได้
29	300	0	300	300	ชนิดปรับค่าได้

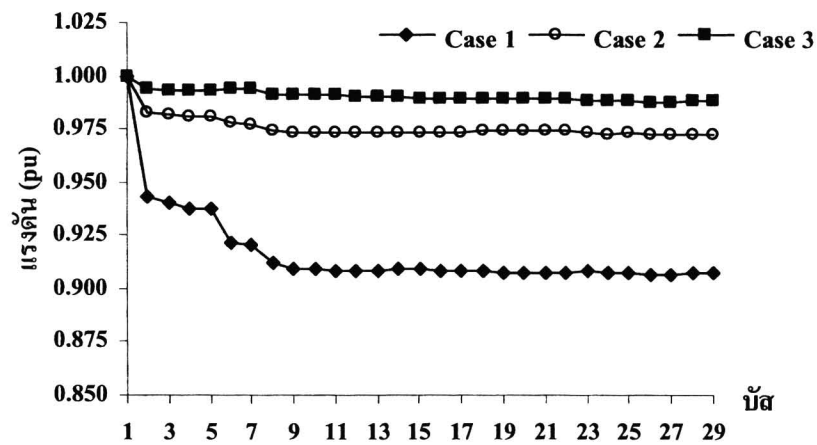
ตารางที่ 7-6 สรุปผลการคำนวณของกรณีศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

รายละเอียด	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3
1. กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW)			
1.1 ที่ระดับโหลดต่ำ	143.25	102.41	111.28
1.2 ที่ระดับโหลดปานกลาง	234.19	155.28	162.54
1.3 ที่ระดับโหลดสูง	427.14	264.38	265.79
2. พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh)			
2.1 ที่ระดับโหลดต่ำ	376,461.38	269,133.07	292,450.86
2.2 ที่ระดับโหลดปานกลาง	1,128,334.92	748,134.58	738,135.05
2.3 ที่ระดับโหลดสูง	561,262.09	347,394.94	349,253.22
2.4 รวมทั้งสามระดับโหลด	2,066,058.39	1,364,662.59	1,379,839.13
2.5 การลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย	-	701,395.80	686,219.26
3. มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (บาท)			
3.1 ที่ระดับโหลดต่ำ	419,905	300,191	326,200
3.2 ที่ระดับโหลดปานกลาง	1,258,545	834,469	873,509
3.3 ที่ระดับโหลดสูง	1,643,263	1,017,103	1,022,544
3.4 รวมทั้งสามระดับโหลด	3,321,713	2,151,763	2,222,253
3.5 การลดลงของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย	-	1,169,950	1,099,460
4. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวเก็บประจุ (บาท)		549,000	666,000
5. ค่าใช้จ่ายรวมของระบบ (บาท) (3.4+4)	3,321,713	2,700,763	2,888,253
6. ค่าใช้จ่ายรวมของระบบที่ลดลง (บาท)	-	620,950	433,460

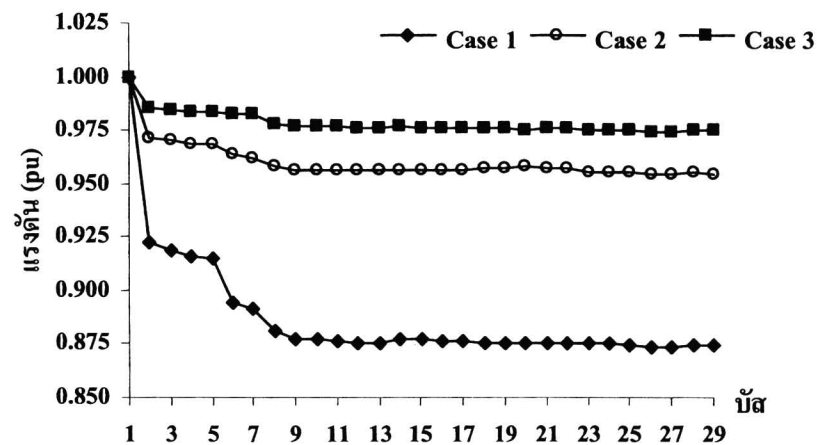
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ ภาพที่ 7-2 ถึงภาพที่ 7-7 แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด โดยที่ระดับโหลดต่ำขนาดแรงดันที่บัสหมายเลข 6 จนถึงบัสหมายเลข 29 มีค่าต่ำกว่า 0.95 pu ส่วนระดับโหลดปานกลางและระดับโหลดสูง ขนาดแรงดันตั้งแต่บัสหมายเลข 2 เป็นต้นไป มีค่าต่ำกว่า 0.95 pu นอกจากนี้ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันก็ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนดเช่นกัน โดยความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่บัสต่างๆ ที่ระดับโหลดต่ำมีค่าประมาณร้อยละ 6-10 ที่ระดับโหลดปานกลางมีค่าประมาณร้อยละ 8-13 และที่ระดับโหลดสูงมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 ในกรณีศึกษาที่ 1 นี้ มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทั้งสามระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 3,321,713 บาท



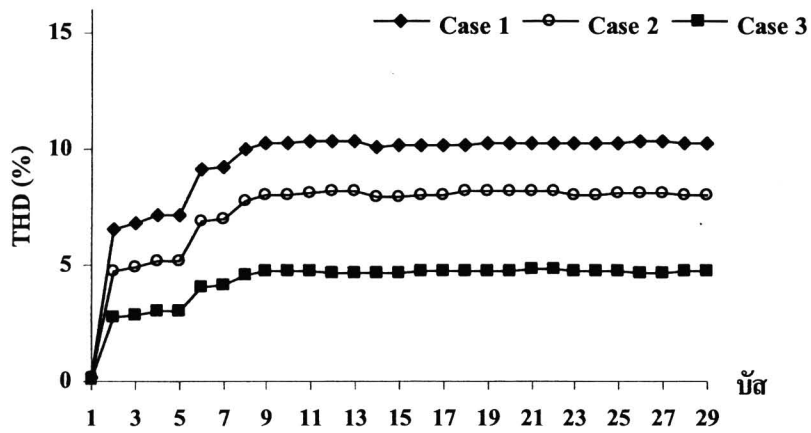
ภาพที่ 7-2 ขนาดแรงดันบัสที่ระดับโหลดต่ำ



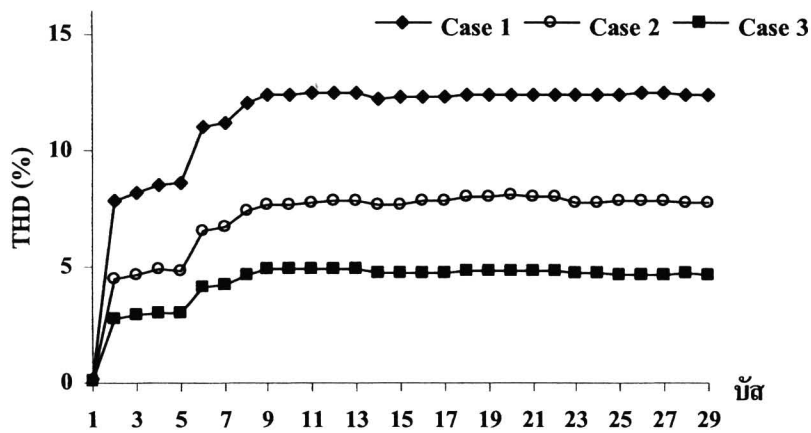
ภาพที่ 7-3 ขนาดแรงดันบัสที่ระดับโหลดปานกลาง



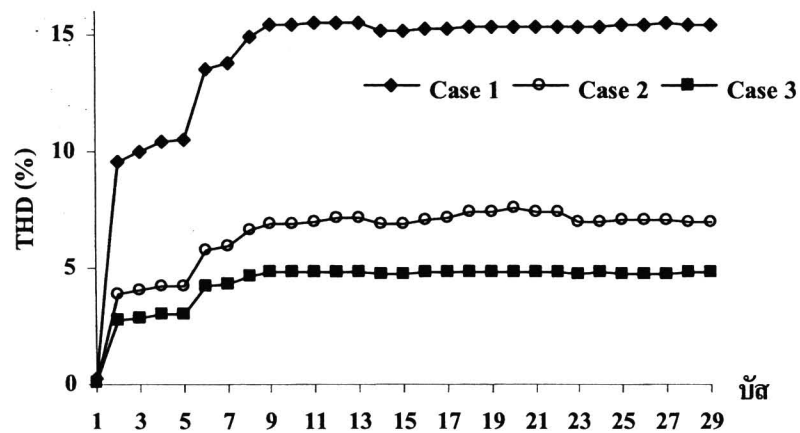
ภาพที่ 7-4 ขนาดแรงดันบัสที่ระดับโหลดสูง



ภาพที่ 7-5 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่ระดับโหลดต่ำ



ภาพที่ 7-6 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่ระดับ โหลดปานกลาง



ภาพที่ 7-7 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่ระดับ โหลดสูง

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งไม่พิจารณาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันเป็นเงื่อนไขบังคับ ผลเฉลยจากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวกำหนดให้ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสต่างๆ จำนวน 6 บัส ปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ติดตั้งมีค่าเท่ากับ 3,450 kVAr แบ่งเป็นตัวเก็บประจุนิตค่าคงที่ 1,200 kVAr และตัวเก็บประจุนิตปรับค่าได้ 2,250 kVAr โดยใช้เงินลงทุนติดตั้ง 549,000 บาท มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดภายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2,151,763 บาท ซึ่งลดลง 1,169,950 บาท (ร้อยละ 35.22) จากกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายรวมของระบบ (ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เกิดจากผลรวมของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียกับเงินลงทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุ) พบว่า ค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2,700,763 บาท แล้วมีค่าลดลง 620,950 บาท (ร้อยละ 18.69) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1

ภาพที่ 7-2 ถึง ภาพที่ 7-7 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2 สามารถปรับปรุงขนาดแรงดันบัสในทุกระดับโหลดให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (0.95-1.05 pu) แต่เมื่อไม่พิจารณาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันเป็นเงื่อนไขบังคับ การติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2 จึงช่วยได้แต่เพียงทำให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมีค่าลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 เท่านั้น แต่ไม่สามารถควบคุมให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6-8 ที่ทุกระดับโหลด

ในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งพิจารณาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันเป็นเงื่อนไขบังคับ วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเสนอให้ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสต่างๆ จำนวน 8 บัส ปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ติดตั้งมีค่าเท่ากับ 4,500 kVAr แบ่งเป็นตัวเก็บประจุนิตค่าคงที่ 2,400 kVAr และตัวเก็บประจุนิตปรับค่าได้ 2,100 kVAr โดยใช้เงินลงทุนติดตั้ง 666,000 บาท มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดภายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2,222,253 บาท ซึ่งลดลง 1,099,460 บาท (ร้อยละ 33.10) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 ส่วนค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2,888,253 บาท ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 เท่ากับ 433,460 บาท (ร้อยละ 13.05) โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 3 สามารถปรับปรุงขนาดแรงดันบัสและความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในทุกระดับโหลดให้มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขบังคับ (พิจารณาจากภาพที่ 7-2 ถึง ภาพที่ 7-7)

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 จะเห็นได้ว่ามูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดภายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้งสองกรณีมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 3 เท่ากับ 70,490 บาท) การนำความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมาเป็นเงื่อนไข

บังคับในกรณีศึกษาที่ 3 ทำให้ตัวเก็บประจุที่ต้องติดตั้งมีจำนวนเพิ่มขึ้นและปริมาณกำลังรีแอกทีฟ จากตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงขึ้น เงินลงทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุของกรณีศึกษาที่ 3 จึงมีราคาแพงกว่ากรณีศึกษาที่ 2 ด้วยเหตุนี้ ค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 จึงมีค่าต่ำกว่าค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 3 เท่ากับ 187,490 บาท

ถึงแม้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 จะมีค่าต่ำกว่าค่าใช้จ่ายรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 3 แต่การที่ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 2 ยังคงสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขบังคับ ก็อาจทำให้ระบบได้รับผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เชิงเส้น ด้วยเหตุนี้ แนวทางการติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 3 จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบจำหน่าย

## 7.2 การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไม่สมดุล

### 7.2.1 บทนำ

ระบบจำหน่ายจริงในทางปฏิบัติเป็นระบบไม่สมดุลเนื่องจากหลายสาเหตุ อาทิ การใช้งาน โหลดแบบเฟสเดียว โหลดแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน สายป้อนบางช่วงติดตั้งเพียงเฟสเดียวหรือเพียงสองเฟส พารามิเตอร์ของสายป้อนแต่ละเฟสมีค่าต่างกัน หรือมีการเชื่อมร่วมระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของตัวนำสายป้อน (Chen, Hsu and Yan, 1995; Kersting, 2001) สำหรับระบบจำหน่ายซึ่งมีโหลดไม่เชิงเส้นต่ออยู่ ความไม่สมดุลของระบบยังทำให้การกำเนิดและการแพร่กระจายของฮาร์มอนิกมีความซับซ้อนมากขึ้น (Xu, Marti and Dommel, 1991)

เนื้อหาในหัวข้อนี้กล่าวถึงการใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อกำหนดแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไม่สมดุลโดยพิจารณาผลกระทบจากระดับความไม่สมดุลของโหลดและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งคัดแปลงจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

### 7.2.2 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

ฟังก์ชันจุดประสงค์มีรายละเอียดตามสมการที่ (7-9) ซึ่งเป็นผลรวมของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากทุกระดับโหลดในระยะเวลาหนึ่งปี ค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุด และต้นทุนการติดตั้งตัวเก็บประจุ

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S (k_e^j T^j P_L^j) + k_p P_L^P + \sum_{k \in \text{NCF}} k_{cf} Q C_k^f + \sum_{k \in \text{NCs}} k_{cs} Q C_k^s \quad (7-9)$$

การศึกษาครั้งนี้พิจารณาทั้งความไม่สมดุลและความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดที่มีผลต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ใช้คำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์จึงเป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากทั้งสามเฟสซึ่งรวมผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เชิงเส้น

เงื่อนไขบังคับแรก คือ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟส ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Caramia et al., 1999) โดย  $p$  และ  $m$  คือ เฟส  $A$ ,  $B$  และ  $C$  ที่ต้องการพิจารณา

$$P_{i,j}^p = V_{i,j}^p \sum_{n=1}^{NB} \sum_{m=A}^C V_{n,j}^m [G_{in}^{pm} \cos \theta_{in,j}^{pm} + B_{in}^{pm} \sin \theta_{in,j}^{pm}] \quad (7-10)$$

$$Q_{i,j}^p = V_{i,j}^p \sum_{n=1}^{NB} \sum_{m=A}^C V_{n,j}^m [G_{in}^{pm} \sin \theta_{in,j}^{pm} - B_{in}^{pm} \cos \theta_{in,j}^{pm}] \quad (7-11)$$

$$\theta_{in,j}^{pm} = \theta_{i,j}^p - \theta_{n,j}^m \quad (7-12)$$

เงื่อนไขบังคับอื่นๆ ได้แก่ ขนาดแรงดันบัสที่แต่ละเฟส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่แต่ละเฟส และปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในแต่ละบัส

$$V^{\min} \leq \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_{i,j}^{h,p}|^2} \leq V^{\max} \quad (7-13)$$

$$THD_{V,i}^{p,j} (\%) = \frac{100}{|V_{i,j}^{1,p}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{nh} |V_{i,j}^{h,p}|^2} \leq THD_V^{\max} \quad (7-14)$$

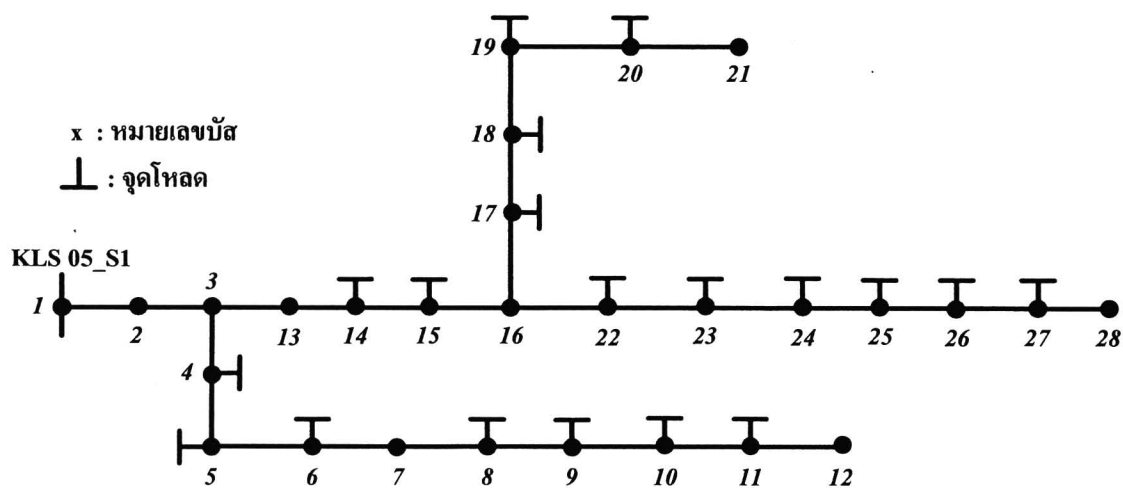
$$Qc_k^j \leq Qc^{\max} \quad \text{where } k \in \text{NC} \quad (7-15)$$

### 7.2.3 ข้อมูลแบบจำลองระบบจำหน่าย

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากวงจรสายป้อนหมายเลข 5 ในสถานีไฟฟ้ากาฬสินธุ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (เชี่ยวชาญ, 2549) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบจำหน่าย KLS05\_S1 โครงสร้างระบบมีลักษณะตามภาพที่ 7-8 ข้อมูลสายป้อนเป็นข้อมูลเดิมของระบบตามรายละเอียดในตารางที่ 7-7 ส่วนข้อมูลโหลดได้ดัดแปลงให้มีค่าตามตารางที่ 7-8 โดย



ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและความต้องการกำลังรีแอกทีฟของ โหลด คำนวณจากการใช้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85 แบบล้าหลัง



ภาพที่ 7-8 ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองระบบจำหน่าย KLS05\_S1

ตารางที่ 7-7 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่าย KLS05\_S1

หมายเลขบัส ปลายด้านส่ง	หมายเลขบัส ปลายด้านรับ	ความยาว (km)	ชนิด ของสาย	หมายเลขบัส ปลายด้านส่ง	หมายเลขบัส ปลายด้านรับ	ความยาว (km)	ชนิด ของสาย
1	2	1.48	AAC185	15	16	3.36	AAC185
2	3	3.92	AAC185	16	17	0.20	AAC185
3	4	0.37	ACSR50	17	18	0.57	AAC185
4	5	0.12	ACSR50	18	19	0.37	AAC185
5	6	0.26	ACSR50	19	20	0.15	AAC185
6	7	0.80	ACSR50	20	21	2.22	AAC185
7	8	1.10	ACSR50	16	22	1.05	AAC185
8	9	2.07	ACSR50	22	23	1.88	AAC185
9	10	0.91	ACSR50	23	24	0.80	AAC185
10	11	2.67	ACSR50	24	25	0.25	AAC185
11	12	1.59	ACSR50	25	26	0.25	AAC185
3	13	3.27	AAC185	26	27	2.50	AAC185
13	14	0.44	AAC185	27	28	0.31	AAC185
14	15	1.40	AAC185	-	-	-	-

ตารางที่ 7-8 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่าย KLS05\_S1

หมายเลขบัส	โหลด (kVA)	หมายเลขบัส	โหลด (kVA)
1	-	15	25
2	-	16	-
3	-	17	250
4	50	18	80
5	160	19	50
6	25	20	25
7	-	21	-
8	111.803	22	110
9	50	23	167.5
10	35	24	1,550
11	150	25	930
12	-	26	775
13	-	27	110
14	50	28	-

#### 7.2.4 ข้อมูลการคำนวณ

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 22 kV และ 100 MVA กำหนดให้ขนาดแรงดันที่บัสอ้างอิงเท่ากับ 1.0 pu ระดับโหลดแบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับปกติ (Off-peak) และระดับสูง (Peak) ตามรายละเอียดในตารางที่ 7-9 โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางมีค่าเท่ากับความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด ส่วนอันดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา ได้แก่ อันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25

ตารางที่ 7-9 ข้อมูลระดับโหลดสำหรับแบบจำลองระบบจำหน่าย KLS05\_S1

ระดับโหลด	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 ปี (ชั่วโมง)
ปกติ	1.0	4,015
สูง	1.2	4,745

$k_e^j$  ที่ใช้คำนวณมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าเท่ากับ 1.1154 บาท/kWh ในช่วงระดับโหลดปกติ และเท่ากับ 2.9278 บาท/kWh ในช่วงระดับโหลดสูง สำหรับค่าใช้จ่ายของการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงระดับโหลดสูงสุดมีค่าเป็นศูนย์ ( $k_p = 0$ ) เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่ต้องรับภาระค่าใช้จ่ายส่วนนี้จากการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

กำหนดให้ตัวเก็บประจุแบบสามเฟสมีค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับการติดตั้งในแต่ละชั้น เท่ากับ 300 kVAr โดยกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุจะถูกแบ่งไปชดเชยในแต่ละเฟสด้วยปริมาณที่เท่ากัน  $k_{cf}$  และ  $k_{cs}$  ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่และชนิดปรับค่าได้ มีค่าเท่ากับ 32,000 บาท/ชั้น และ 43,200 บาท/ชั้น สำหรับเงื่อนไขบังคับ กำหนดให้  $V^{\min}$  และ  $V^{\max}$  เท่ากับ 0.95 pu และ 1.05 pu ส่วนค่าของ  $THD_V^{\max}$  และ  $Q_C^{\max}$  คือ 5% และ 1,500 kVAr

### 7.2.5 พารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

สำหรับพารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลย ได้กำหนดให้อนุภาคในกลุ่มประกอบด้วย 100 อนุภาค และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุดเท่ากับ 150 รอบ การกระตุ้นกลุ่มอนุภาคเกิดขึ้นเมื่อค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใน 30 รอบการคำนวณ ความเร็วของอนุภาคเมื่อไม่มีการกระตุ้น ให้คำนวณจาก

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_{1d}^t(pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2r_{2d}^t(gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (7-16)$$

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน  $c_1$  และ  $c_2$  มีค่าเท่ากับ 2.0

### 7.2.6 กรณีศึกษาที่พิจารณา

การศึกษานี้ต้องการพิจารณาผลกระทบของระดับความไม่สมดุลและความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดที่มีต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุ จึงกำหนดกรณีศึกษาทั้งหมด 15 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีมีค่าร้อยละความไม่สมดุล (%UB) และร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้น (%NL) ของโหลดที่แตกต่างกันตามรายละเอียดในตารางที่ 7-10 การกำหนดเงื่อนไขความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละกรณีศึกษา ทำให้โหลดในแต่ละเฟสมีค่าต่างกัน แต่ผลรวมของโหลดจากทั้งสามเฟสในทุกกรณีศึกษายังคงมีค่าเท่ากัน

ความหมายของกรณีศึกษาต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ เช่น ในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งร้อยละความไม่สมดุลและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นกรณีที่โหลดในระบบเป็นโหลดเชิงเส้นแบบสมดุล ส่วนกรณีอื่นๆ เช่น ในกรณีศึกษาที่ 9 ซึ่งความไม่สมดุลของโหลดเท่ากับร้อยละ 10 หมายความว่า ปริมาณโหลดในเฟส B มีค่าต่ำกว่าปริมาณโหลดในเฟส A เท่ากับร้อยละ 10 แต่ปริมาณโหลดในเฟส C จะสูงกว่าปริมาณโหลดในเฟส A เท่ากับร้อยละ 10 ในขณะที่ความไม่เป็นเชิงเส้นร้อยละ 15 ของกรณีศึกษาที่ 9 แสดงว่า โหลดในทุกเฟสของกรณีศึกษานี้ ถูกกำหนดให้มีค่าความไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับร้อยละ 15

การติดตั้งตัวเก็บประจุในทุกกรณีศึกษา ได้พิจารณาเป็นปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ Type C กล่าวคือ ผลเฉลยที่ได้จากวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวต้องแสดงข้อมูลของจำนวนตัวเก็บประจุและตำแหน่งติดตั้ง รวมทั้งค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุเหล่านั้น ณ ระดับโหลดต่างๆ

ตารางที่ 7-10 กรณีศึกษาสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไม่สมดุล

กรณีศึกษาที่	ร้อยละความไม่สมดุลของโหลด (%UB)	ร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด (%NL)	กรณีศึกษาที่	ร้อยละความไม่สมดุลของโหลด (%UB)	ร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด (%NL)
1	0	0	10	15	0
2	0	15	11	15	15
3	0	30	12	15	30
4	5	0	13	20	0
5	5	15	14	20	15
6	5	30	15	20	30
7	10	0	-	-	-
8	10	15	-	-	-
9	10	30	-	-	-

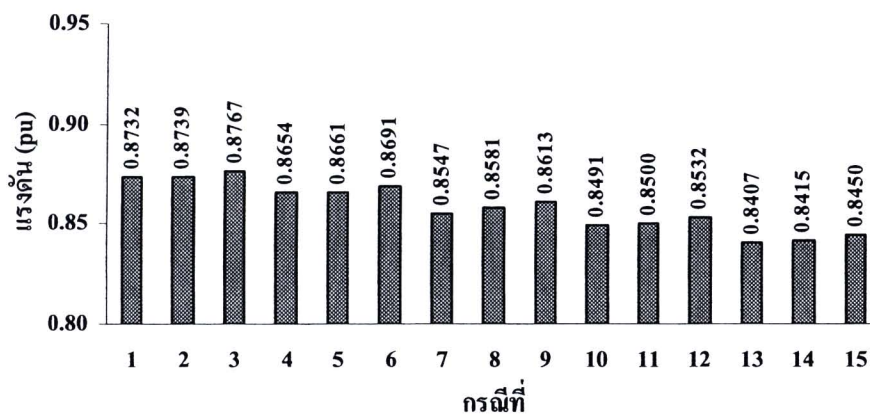
#### 7.2.7 ผลที่ได้จากกรณีศึกษาสำหรับสมรรถนะของระบบก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ

หัวข้อที่ใช้ประเมินสมรรถนะของระบบก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ ได้แก่ ค่าต่ำสุดของขนาดแรงดันบัสจากทั้งสองระดับโหลด (ค่าสูงสุดของขนาดแรงดันบัสไม่ต้องพิจารณา เนื่องจากเท่ากับ 1.0 pu ณ บัสอ้างอิง) ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจากทั้งสองระดับโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งสามเฟสที่โหลดระดับปรกติและระดับสูง ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในรอบหนึ่งปี

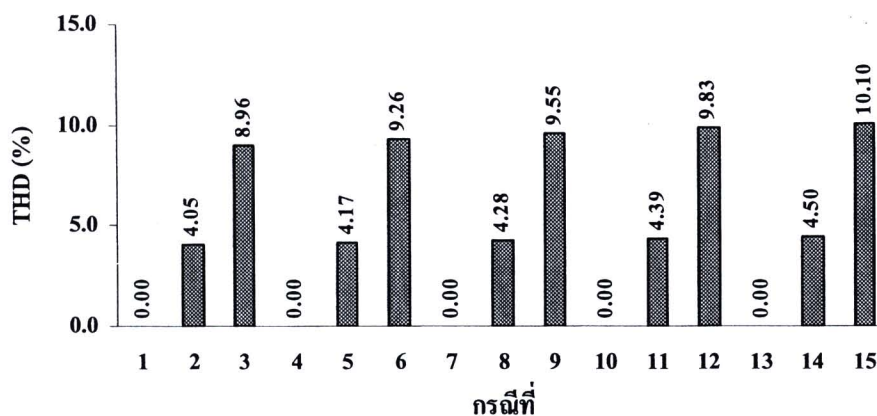
จากภาพที่ 7-9 จะเห็นได้ว่าขนาดแรงดันบัสก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 15 กรณีศึกษา ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด เนื่องจากแรงดันที่บางเฟสในบางบัสมีค่าต่ำกว่า 0.95 pu และจากนิยามร้อยละความไม่สมดุลของโหลด ทำให้ทราบว่าโหลดในเฟส C จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความไม่สมดุลของโหลดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น ขนาดแรงดันต่ำสุดจึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละความไม่สมดุลของโหลด และเมื่อเปรียบเทียบค่าต่ำสุดของแรงดันเฉพาะกรณีศึกษาที่ความไม่สมดุลของโหลดมีค่าเท่ากัน (เช่น เปรียบเทียบระหว่างกรณีศึกษาที่ 10, 11, และ 12 ซึ่งค่าความไม่สมดุลของโหลดเท่ากับร้อยละ 15) ภาพที่ 7-9 แสดงให้เห็นว่า ค่าต่ำสุดของแรงดันมีค่าสูงขึ้น

ตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละความไม่เชิงเส้นของโหลด ทั้งนี้ เนื่องจากความไม่เชิงเส้นของโหลดที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุปกรณ์ประกอบส่วนที่เป็นแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้น ขนาดแรงดันบัลซึ่งเป็นค่ารากที่สองเฉลี่ยของแรงดันที่ความถี่มูลฐานกับแรงดันที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ จึงมีค่าสูงขึ้น

จากภาพที่ 7-10 จะเห็นได้ว่า ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับเฉพาะกรณีศึกษาซึ่ง โหลดมีค่าความไม่เชิงเส้นร้อยละ 30 ซึ่งได้แก่ กรณีศึกษาที่ 3, 6, 9, 12 และ 15 โดยค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่บางเฟสในบางบัสของกรณีศึกษาเหล่านี้มีค่ามากกว่าร้อยละ 5 และเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกรณีศึกษาที่ความไม่เชิงเส้นของโหลดมีค่าเท่ากัน ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจะสูงขึ้นตามค่าร้อยละความไม่สมดุลของโหลดที่เพิ่มขึ้น

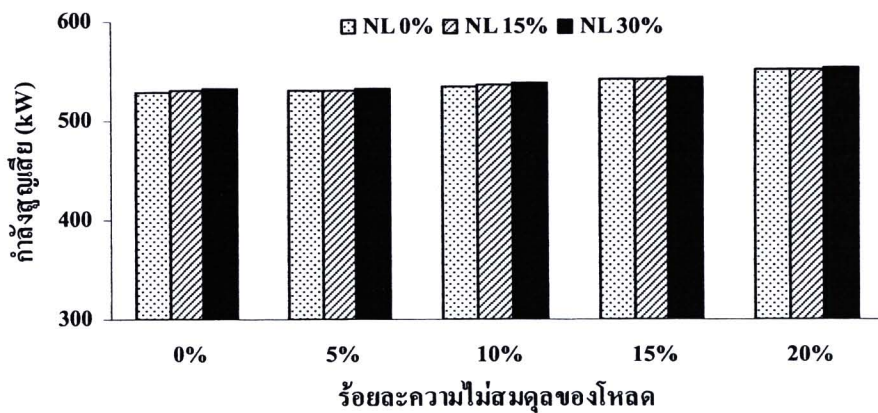


ภาพที่ 7-9 ค่าต่ำสุดของแรงดันบัลก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ

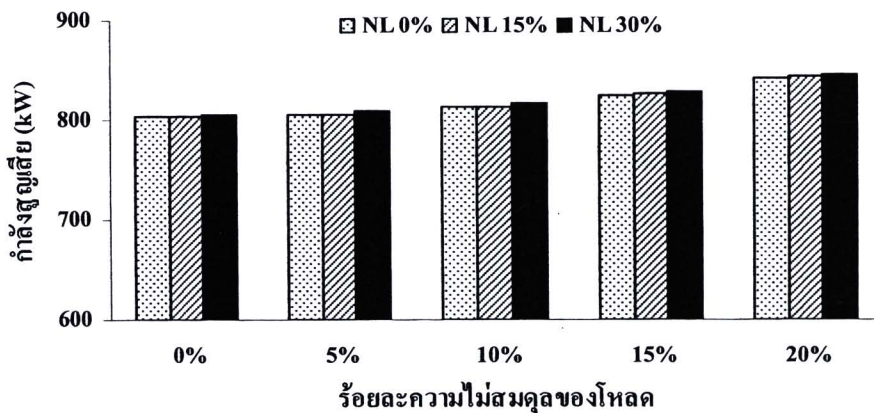


ภาพที่ 7-10 ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งสามเฟสของระบบก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุของกรณีศึกษาทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 7-11 (ช่วงระดับโหลดปกติ) และภาพที่ 7-12 (ช่วงระดับโหลดสูง) โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทั้งสองระดับโหลดมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มของร้อยละความไม่สมดุลของโหลด และเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกรณีศึกษาที่ความไม่สมดุลของโหลดมีค่าเท่ากัน ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อร้อยละความไม่สมดุลของโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น



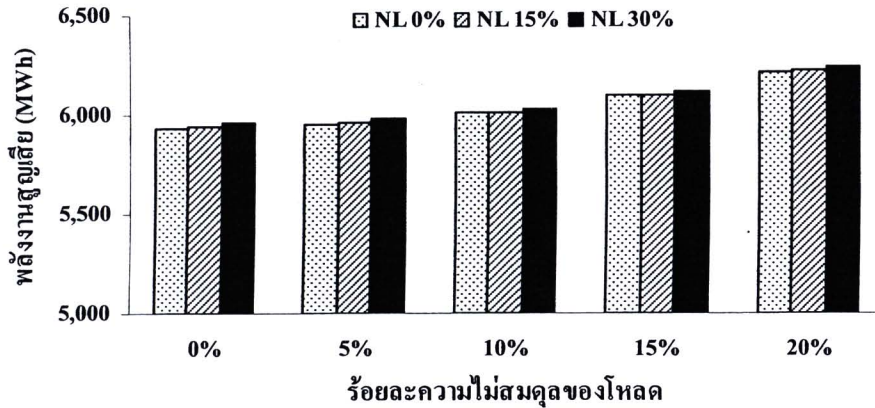
ภาพที่ 7-11 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับโหลดปกติก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ



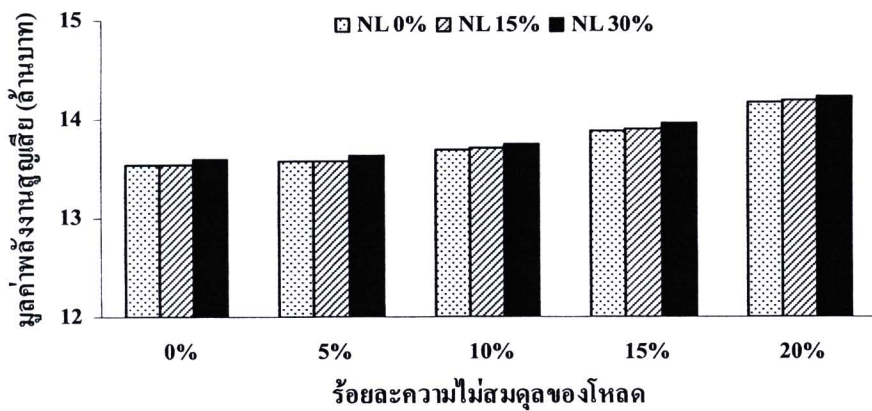
ภาพที่ 7-12 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับโหลดสูงก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ

ผลกระทบจากร้อยละความไม่สมดุลและร้อยละความไม่สมดุลของโหลดที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ผลคูณของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับจำนวนชั่วโมง) และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ผลคูณของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียกับค่า  $k_v^j$ ) มีลักษณะเช่นเดียวกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 7-13 และภาพที่ 7-14





ภาพที่ 7-13 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในรอบหนึ่งปีก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 7-14 มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในรอบหนึ่งปีก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุ

7.2.8 ผลที่ได้จากกรณีศึกษาสำหรับสมรรถนะของระบบภายหลังติดตั้งตัวเก็บประจุ

ข้อมูลในตารางที่ 7-11 แสดงให้เห็นว่า ผลเฉลยเหมาะที่สุดของกรณีศึกษาทั้งหมดซึ่งได้จากขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว ทำให้การติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนด ขนาดแรงดันต่ำสุดและขนาดแรงดันสูงสุดจากทั้งสองระดับ โหลดของทุบัสไม่ว่าจะเป็นที่เฟสใด มีค่าอยู่ในช่วง 0.95-1.05 pu ส่วนค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจากทั้งสองระดับโหลดมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 และค่าสูงสุดของกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้งที่แต่ละบัสก็มีค่าไม่มากกว่า 1,500 kVAr

ตารางที่ 7-11 ค่าที่ใช้พิจารณาความสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ

กรณีศึกษาที่	แรงดันต่ำสุด	แรงดันสูงสุด	ค่าสูงสุดของความเพี้ยน	กำลังรีแอกทีฟสูงสุด
	จากทั้งสองระดับโหลด (pu)	จากทั้งสองระดับโหลด (pu)	ฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจากทั้งสองระดับโหลด (%)	ของตัวเก็บประจุซึ่งติดตั้ง ณ บัสใดบัสหนึ่ง (kVAr)
1	0.9546	1.0000	0.00	1,200
2	0.9541	1.0012	3.43	1,500
3	0.9750	1.0060	4.81	1,500
4	0.9504	1.0000	0.00	1,500
5	0.9546	1.0009	4.11	1,200
6	0.9695	1.0125	4.98	1,500
7	0.9505	1.0009	0.00	1,500
8	0.9519	1.0055	3.96	1,200
9	0.9648	1.0178	4.98	1,500
10	0.9503	1.0061	0.00	1,500
11	0.9521	1.0123	3.18	1,500
12	0.9633	1.0238	4.88	1,500
13	0.9501	1.0099	0.00	1,500
14	0.9502	1.0121	3.24	1,500
15	0.9676	1.0231	4.75	1,500

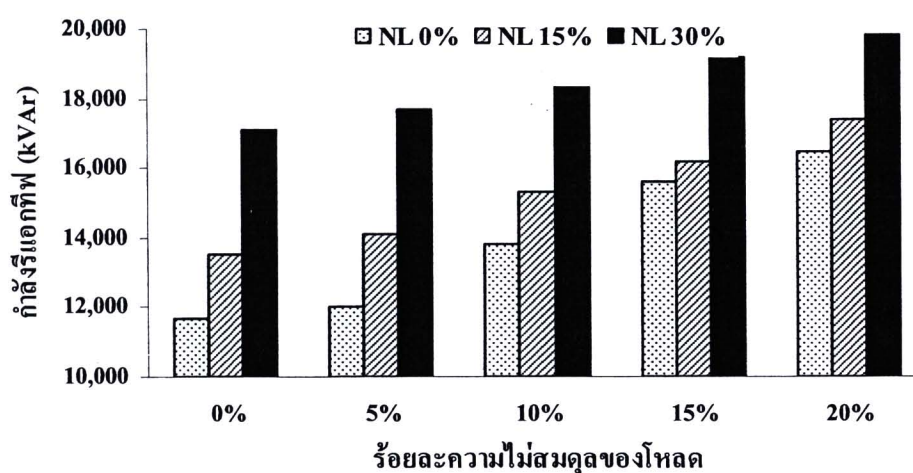
ค่ากำลังรีแอกทีฟรวมทั้งสามเฟสของตัวเก็บประจุที่ต้องติดตั้งในแต่ละกรณีศึกษา มีรายละเอียดตามตารางที่ 7-12 และภาพที่ 7-15 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ร้อยละความไม่สมดุลและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดต่างก็ส่งผลกระทบต่อการใช้ตัวเก็บประจุ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าทั้งสองทำให้ปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุที่ต้องติดตั้งมีค่าสูงขึ้น

การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งสามเฟสระหว่างก่อนและหลังติดตั้งตัวเก็บประจุของกรณีศึกษาทั้งหมดที่ระดับโหลดปกติและระดับโหลดสูงได้แสดงไว้ในตารางที่ 7-13 โดยการชดเชยกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงประมาณร้อยละ 27-38 ที่ระดับโหลดปกติ และลดลงประมาณร้อยละ 35-38 ที่ระดับโหลดสูง



ตารางที่ 7-12 ปริมาณกำลังรีแอกทีฟรวมทั้งสามเฟสของการติดตั้งตัวเก็บประจุ

กรณีศึกษาที่	กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุ ชนิดค่าคงที่ (kVAr)	กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุ ชนิดปรับค่าได้ (kVAr)	กำลังรีแอกทีฟรวม ของตัวเก็บประจุ (kVAr)
1	9,600	2,100	11,700
2	8,700	4,800	13,500
3	5,100	12,000	17,100
4	5,700	6,300	12,000
5	7,800	6,300	14,100
6	10,200	7,500	17,700
7	8,100	5,700	13,800
8	6,300	9,000	15,300
9	7,800	10,500	18,300
10	7,800	7,800	15,600
11	10,200	6,000	16,200
12	7,500	11,700	19,200
13	4,200	12,300	16,500
14	6,900	10,500	17,400
15	8,700	11,100	19,800



ภาพที่ 7-15 ปริมาณกำลังรีแอกทีฟรวมทั้งสามเฟสของการติดตั้งตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 7-13 กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนและหลังติดตั้งตัวเก็บประจุ

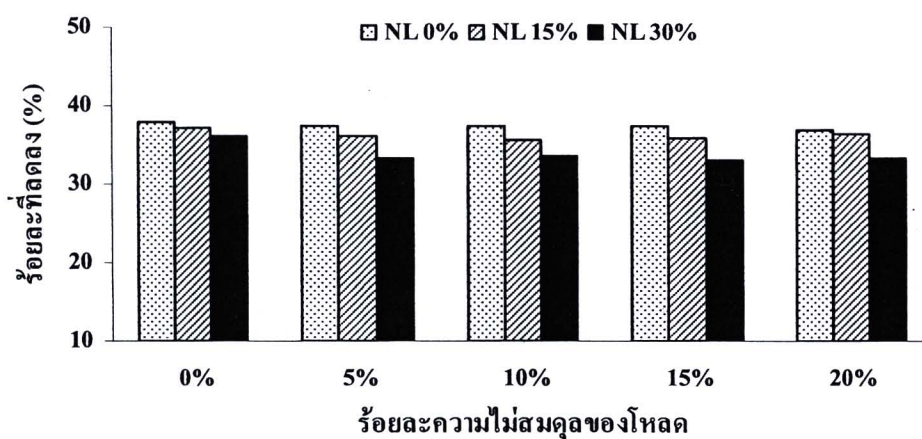
กรณีศึกษาที่	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับโหลดปกติ (kW)			กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับโหลดสูง (kW)		
	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง	ร้อยละที่ลดลง	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง	ร้อยละที่ลดลง
1	529.53	336.54	36.45	803.24	492.48	38.69
2	530.11	343.13	35.27	803.99	497.88	38.07
3	532.14	356.90	35.93	806.69	500.38	37.97
4	530.93	346.38	34.76	805.68	491.62	38.98
5	531.51	352.40	33.70	806.43	505.36	37.33
6	533.54	372.83	30.12	809.13	523.31	35.32
7	535.13	344.76	35.57	813.02	500.30	38.46
8	535.71	363.92	32.07	813.77	506.32	37.78
9	537.75	387.28	27.98	816.48	517.78	36.58
10	542.15	346.62	36.07	825.32	509.06	38.32
11	542.74	372.64	31.34	826.37	510.22	38.26
12	544.77	407.81	25.14	828.77	517.91	37.51
13	552.02	368.03	33.33	842.66	513.18	39.10
14	552.61	369.96	33.05	843.40	521.83	38.13
15	554.65	402.81	27.38	846.10	537.79	36.44

การลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายหลังติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งหมดมีค่าลดลงตามรายละเอียดในตารางที่ 7-14 โดยร้อยละที่ลดลงของค่าทั้งสองได้แสดงไว้ในภาพที่ 7-16 และ ภาพที่ 7-17 ซึ่งจะเห็นว่า ร้อยละความไม่สมดุลและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดมีผลน้อยมากต่อการลดลงของค่าทั้งสอง จากกรณีศึกษาทั้งหมด พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียภายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุจะลดลงประมาณร้อยละ 33-38 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ

การที่ความไม่สมดุลและความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดส่งผลต่อปริมาณกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุที่ต้องติดตั้ง ค่าใช้จ่ายรวมในแต่ละกรณีศึกษาจึงมีค่าแตกต่างกันตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 7-15 และร้อยละที่ลดลงของค่าใช้จ่ายรวมก็แตกต่างกันตามรายละเอียดในภาพที่ 7-18 โดยร้อยละที่ลดลงของค่าใช้จ่ายรวมจะมีค่าน้อยลง เมื่อร้อยละความไม่สมดุลและร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าทั้งสองทำให้เงินลงทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าใช้จ่ายรวมจะลดลงได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 28 ในกรณีศึกษาที่ 1 และลดลงได้น้อยที่สุดประมาณร้อยละ 17 ในกรณีศึกษาที่ 15

ตารางที่ 7-14 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

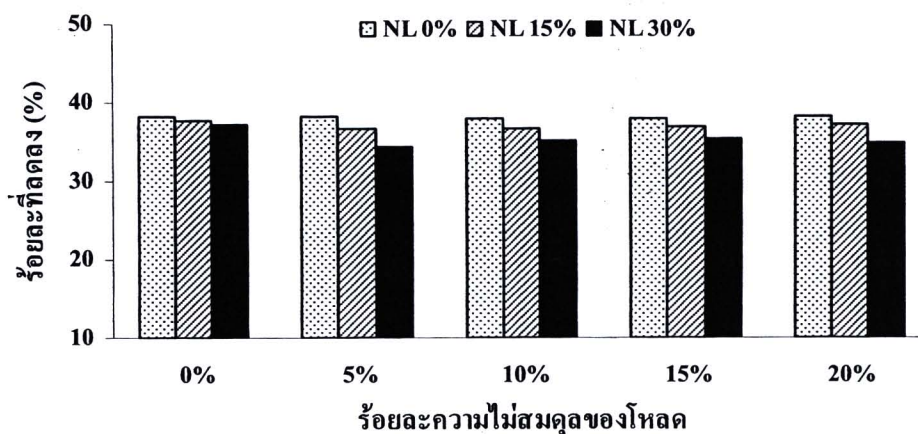
กรณีศึกษาที่	พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (MWh)		มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ล้านบาท)	
	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง
1	5,937.40	3,688.02	13.53	8.35
2	5,943.33	3,740.13	13.54	8.45
3	5,964.29	3,807.27	13.59	8.55
4	5,954.62	3,723.43	13.57	8.38
5	5,960.54	3,812.81	13.58	8.60
6	5,981.51	3,980.00	13.63	8.94
7	6,006.34	3,758.13	13.69	8.49
8	6,012.25	3,863.62	13.70	8.66
9	6,033.23	4,011.81	13.75	8.93
10	6,092.88	3,807.16	13.89	8.62
11	6,098.78	3,917.15	13.91	8.76
12	6,119.77	4,094.82	13.95	9.02
13	6,214.77	3,912.68	14.18	8.78
14	6,220.65	3,961.47	14.19	8.91
15	6,241.65	4,169.08	14.24	9.28



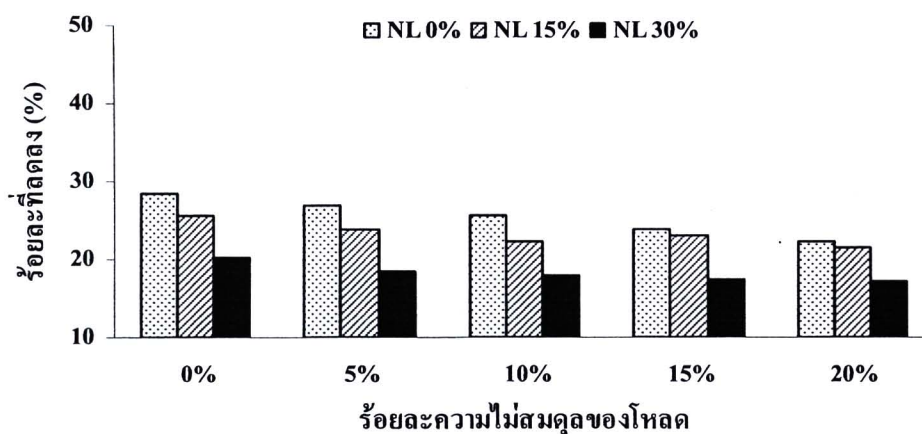
ภาพที่ 7-16 ร้อยละที่ลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

ตารางที่ 7-15 ค่าใช้จ่ายรวมของแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษาที่	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง		
	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ล้านบาท)	ค่าติดตั้งตัวเก็บประจุ (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (ล้านบาท)	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ล้านบาท)	ค่าติดตั้งตัวเก็บประจุ (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (ล้านบาท)
1	13.53	-	13.53	8.35	1.33	9.68
2	13.54	-	13.54	8.45	1.62	10.07
3	13.59	-	13.59	8.55	2.27	10.82
4	13.57	-	13.57	8.38	1.52	9.90
5	13.58	-	13.58	8.60	1.74	10.34
6	13.63	-	13.63	8.94	2.17	11.11
7	13.69	-	13.69	8.49	1.69	10.18
8	13.70	-	13.70	8.66	1.97	10.63
9	13.75	-	13.75	8.93	2.34	11.27
10	13.89	-	13.89	8.62	1.96	10.58
11	13.91	-	13.91	8.76	1.95	10.71
12	13.95	-	13.95	9.02	2.49	11.51
13	14.18	-	14.18	8.78	2.22	11.00
14	14.19	-	14.19	8.91	2.24	11.15
15	14.24	-	14.24	9.28	2.52	11.80



ภาพที่ 7-17 ร้อยละที่ลดลงของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย



ภาพที่ 7-18 ร้อยละที่ลดลงของค่าใช้จ่ายรวม

ผลที่ได้จากกรณีศึกษาทั้งหมดทั้งก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุแสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละความไม่สมดุลของโหลด และถ้าร้อยละความไม่สมดุลของโหลดมีค่าเท่ากัน พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อร้อยละความไม่สมดุลของโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การติดตั้งตัวเก็บประจุจึงต้องคำนึงความไม่สมดุลของโหลดในเฟสต่างๆ และความไม่สมดุลของโหลด เพื่อให้ได้แนวทางการติดตั้งที่เหมาะสม โดยการเพิ่มขึ้นของความไม่สมดุลและความไม่สมดุลของโหลด ทำให้ปริมาณกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุที่ต้องติดตั้งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้งบลงทุนสำหรับการติดตั้งมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่าทั้งสองจะทำให้ปริมาณกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในแต่ละกรณีศึกษา แต่ร้อยละการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียภายหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของกรณีศึกษาทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงกัน