

บทที่ 8

การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่าย

8.1 การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟแบบจุดประสงค์เดียว

8.1.1 บทนำ

การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟเป็นการดำเนินงานประจำวันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อคุมค่าขนาดแรงดันบัสและคุมค่ากำลังรีแอกทีฟ (หรือตัวประกอบกำลัง) ที่สถานีไฟฟ้าย่อย (Baran and Hsu, 1999) ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ (Short, 2003) ได้แก่ ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงขณะมีโหลด (ซึ่งติดตั้งอยู่ที่หม้อแปลงหลักในสถานีไฟฟ้าย่อย) ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน

ความหมายของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ คือ การกำหนดจุดทำงานให้กับตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน โดยต้องประสานการทำงานให้เหมาะสม เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสาม ต่างก็มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันในการปรับสถานะการทำงานของตัวเอง และการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ชนิดหนึ่งสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งได้ ถ้าไม่มีการประสานการทำงานระหว่างกัน อุปกรณ์ทั้งสามอาจทำงานบ่อยครั้งเกินไป จนมีอายุการใช้งานสั้นลงและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามีราคาเพิ่มขึ้น (Lu and Hsu, 1997; Liang and Cheng, 2001)

เนื้อหาในหัวข้อนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อกำหนดตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน สำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายซึ่งมีโหลดไม่เชิงเส้นต่ออยู่ ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยกำหนดให้ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสมดุล

8.1.2 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

กำหนดให้รูปแบบโหลดในแต่ละวัน (Daily Load Pattern) แบ่งความต้องการโหลดในแต่ละช่วงเวลาออกเป็น S ระดับ โดยตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย รวมทั้งตัวเก็บประจุในสายป้อนจะเปลี่ยนสถานะการทำงานในช่วงที่ระดับโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น วัตถุประสงค์ของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในการศึกษารุ่นนี้ คือ ต้องการให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในหนึ่งวันของระบบมีค่าต่ำสุด

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S T^j P_L^j \quad (8-1)$$

การศึกษาครั้งนี้พิจารณาผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เชิงเส้นซึ่งต่ออยู่ในระบบกำลังไฟฟ้าสูญเสียจึงมีค่าเท่ากับ

$$P_L^j = \sum_{h=1}^{nh} P_L^{h,j} \quad (8-2)$$

เงื่อนไขบังคับ ได้แก่ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ จำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานและขอบเขตสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมของทั้งสาม คือ ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (8-3)$$

$$Q_i^j = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (8-4)$$

$$V^{\min} \leq \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_i^{h,j}|^2} \leq V^{\max} \quad (8-5)$$

$$THD_{V,i}^j \leq THD_V^{\max} \quad (8-6)$$

$$|pf_{sys}^j| \geq pf_{sys}^{\min} \quad (8-7)$$

$$N_{tap} = \sum_{j=1}^S \left| Tap^j - Tap^{j-1} \right| \leq N_{tap}^{\max} \quad (8-8)$$

$$N_{CS,m} = \sum_{j=1}^S \left| CS_m^j - CS_m^{j-1} \right| \leq N_{CS}^{\max} \quad (8-9)$$

$$N_{CF,n} = \sum_{j=1}^S \left| CF_n^j - CF_n^{j-1} \right| \leq N_{CF}^{\max} \quad (8-10)$$

$$Tap^{\min} \leq Tap^j \leq Tap^{\max} \quad (8-11)$$

$$0 \leq CS_m^j \leq CS_m^{\max} \quad (8-12)$$

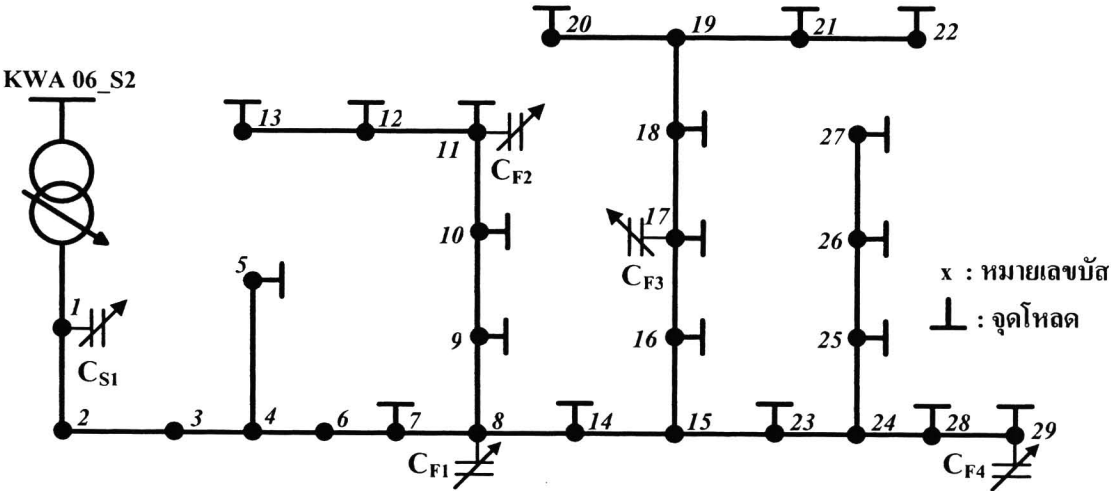
$$0 \leq CF_n^j \leq CF_n^{\max} \quad (8-13)$$

8.1.3 ข้อมูลแบบจำลองระบบจำหน่าย

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากวงจรสายป้อน KWA06 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สมชาย, 2549) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2 ข้อมูลสายป้อนเป็นข้อมูลเดิมของระบบตามรายละเอียดในตารางที่ 8-1 การดัดแปลงระบบเพื่อใช้ในการศึกษารุ่นนี้ ประกอบด้วยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งทำให้โครงสร้างของระบบมีลักษณะตามภาพที่ 8-1 และการกำหนดความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงรวมทั้งร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 8-2 ส่วนค่าความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้คำนวณจากค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสนั้น โดยใช้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 แบบถ้ำหลัง

8.1.4 ข้อมูลการคำนวณ

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 22 kV และ 100 MVA ระดับโหลดในหนึ่งวันแบ่งเป็น 6 ระดับตามรายละเอียดในตารางที่ 8-3 โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางมีค่าเท่ากับความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด อันดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา ได้แก่ อันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25



ภาพที่ 8-1 ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2

ตารางที่ 8-1 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2

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 8-2 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2

หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	ร้อยละความ ไม่เป็นเชิงเส้น	หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	ร้อยละความ ไม่เป็นเชิงเส้น
1	-	-	16	125	50
2	-	-	17	180	50
3	-	-	18	145	50
4	-	-	19	-	-
5	400	50	20	100	50
6	-	-	21	130	50
7	310	50	22	100	50
8	-	-	23	290	50
9	400	50	24	-	-
10	85	50	25	100	50
11	425	50	26	150	50
12	175	50	27	150	50
13	240	50	28	125	50
14	100	50	29	160	50
15	-	-			

ตารางที่ 8-3 ข้อมูลระดับโหลดสำหรับแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2

ระดับโหลดที่	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 วัน (ชั่วโมง)
1	0.5	8
2	0.85	3
3	1.3	2
4	1.0	3
5	1.15	4
6	0.7	4

กำหนดให้ตำแหน่งปรับตั้งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงมีทั้งหมด 17 ตำแหน่ง กล่าวคือ $Tap^j \in \{-8, -7, \dots, -1, 0, 1, \dots, 7, 8\}$ โดยสามารถปรับแรงดันที่บัสต้นทางให้อยู่ในช่วง -5% ถึง 5% ของขนาดแรงดัน 1.0 pu รายละเอียดของตัวเก็บประจุทั้งหมดซึ่งติดตั้งในระบบได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 8-4

สำหรับเงื่อนไขบังคับ กำหนดให้ $V^{\min}$ และ $V^{\max}$ มีค่าเท่ากับ 0.95 pu และ 1.05 pu ค่าของ $THD_V^{\max}$ และ $pf_{sys}^{\min}$ เท่ากับ 5% และ 0.85 ส่วนจำนวนครั้งสูงสุดในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ $N_{tap}^{\max}$ สำหรับตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงเท่ากับ 10 ครั้ง $N_{CS}^{\max}$ สำหรับตัวเก็บ

ประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละตัวเท่ากับ 8 ครั้ง และ N_{CF}^{max} สำหรับตัวเก็บประจุในสายป้อนแต่ละตัวเท่ากับ 4 ครั้ง

ตารางที่ 8-4 ข้อมูลตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S2

ตำแหน่งของตัวเก็บประจุ	ขนาดชั้น (kVAr)	จำนวนชั้นที่ติดตั้ง
ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย		
ชุดที่ 1	100	3
ตัวเก็บประจุในสายป้อน		
บัสหมายเลข 8	300	6
บัสหมายเลข 11	300	6
บัสหมายเลข 17	300	6
บัสหมายเลข 29	300	6

8.1.5 พารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

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

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

(8-14)

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0

8.1.6 กรณีศึกษาที่พิจารณา

กรณีศึกษาที่พิจารณาประกอบด้วย

กรณีศึกษาที่ 1: ไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ (ที่ทุกระดับโหลด ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงอยู่ที่ตำแหน่ง 0 และตัวเก็บประจุทั้งหมดไม่ได้ถูกสับเข้าเพื่อต่อกับระบบ)

กรณีศึกษาที่ 2: ควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟโดยไม่นำค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันมาเป็นเงื่อนไขบังคับ

กรณีศึกษาที่ 3: ควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟโดยพิจารณาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันเป็นเงื่อนไขบังคับ

8.1.7 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

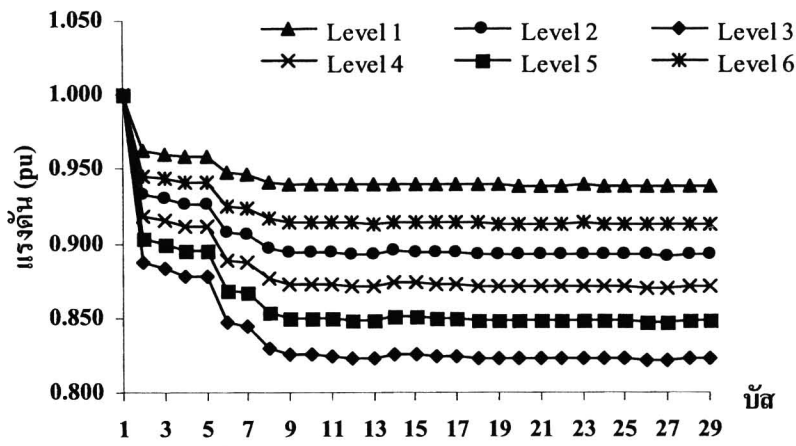
ตารางการทำงานของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 มีรายละเอียดตามตารางที่ 8-5 และตารางที่ 8-6 ส่วนขนาดแรงดันบัสดำความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และค่าตัวประกอบกำลังของระบบสำหรับกรณีศึกษาทั้งสามได้แสดงไว้ในภาพที่ 8-2 ถึงภาพที่ 8-8

ตารางที่ 8-5 ตารางการทำงานสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

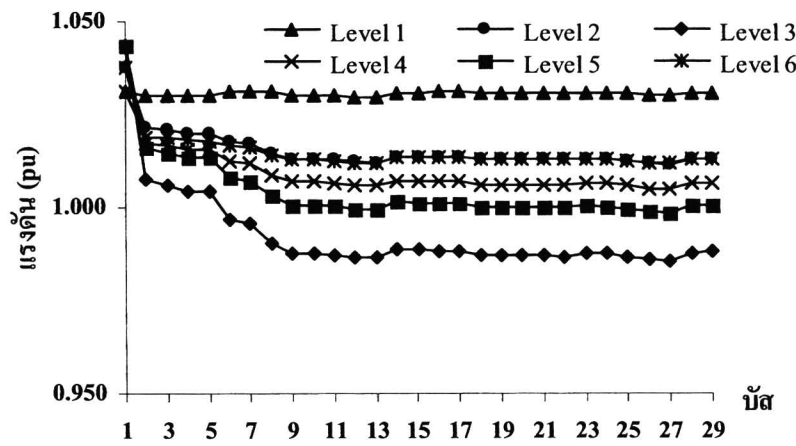
อุปกรณ์	ระดับโหลดที่						จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	5	6	7	6	7	5	6
2) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ชุดที่ 1	0	1	1	1	1	0	2
3) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน บัสหมายเลข 8	2	3	4	4	4	3	4
บัสหมายเลข 11	2	3	4	4	4	2	4
บัสหมายเลข 17	3	4	4	3	4	3	4
บัสหมายเลข 29	2	2	4	3	3	2	4

ตารางที่ 8-6 ตารางการทำงานสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

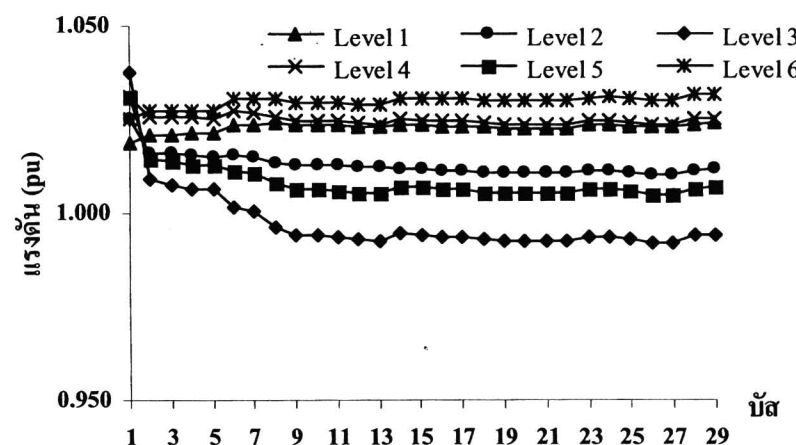
อุปกรณ์	ระดับโหลดที่						จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	3	4	6	5	5	4	6
2) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ชุดที่ 1	1	2	3	2	3	1	6
3) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน บัสหมายเลข 8	3	5	5	5	5	3	4
บัสหมายเลข 11	3	5	5	5	5	3	4
บัสหมายเลข 17	1	1	3	3	3	3	4
บัสหมายเลข 29	3	3	5	5	5	5	4



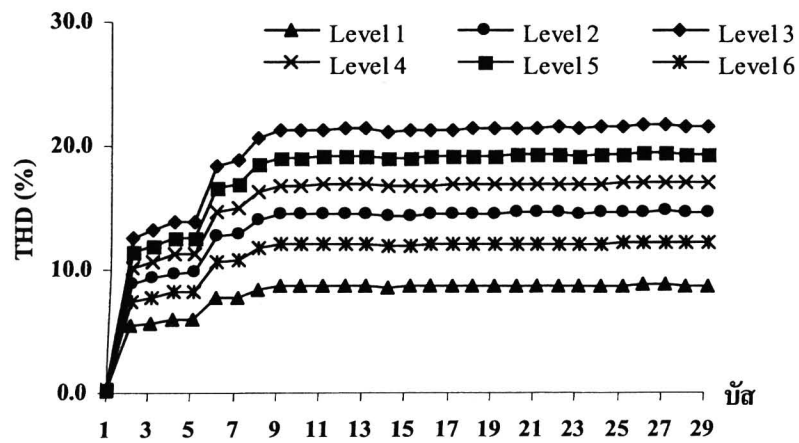
ภาพที่ 8-2 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 1



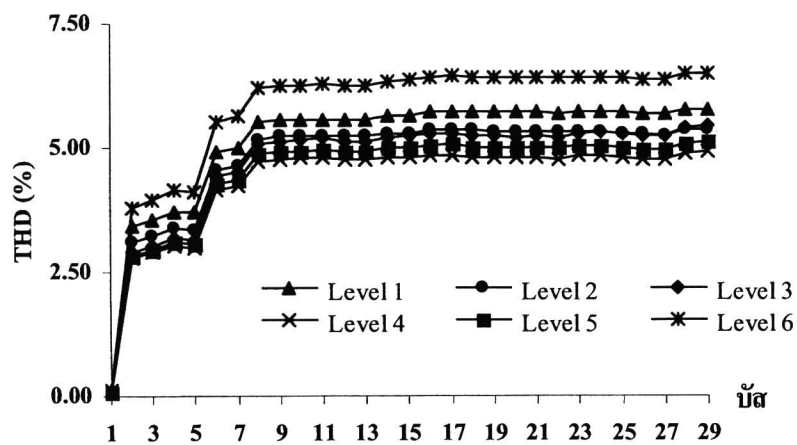
ภาพที่ 8-3 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 2



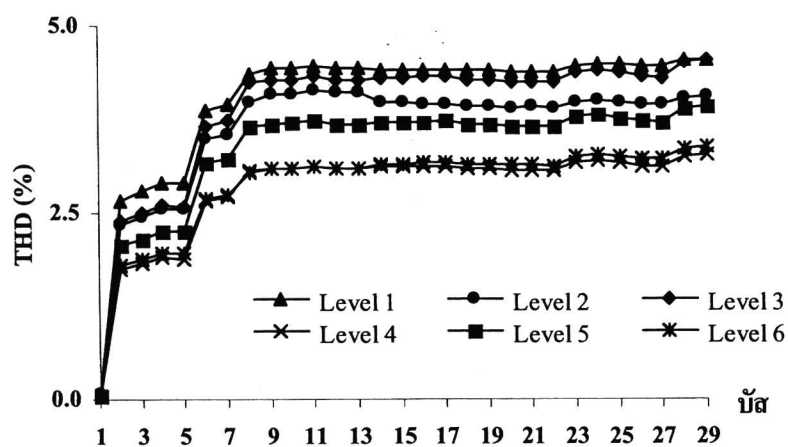
ภาพที่ 8-4 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 3



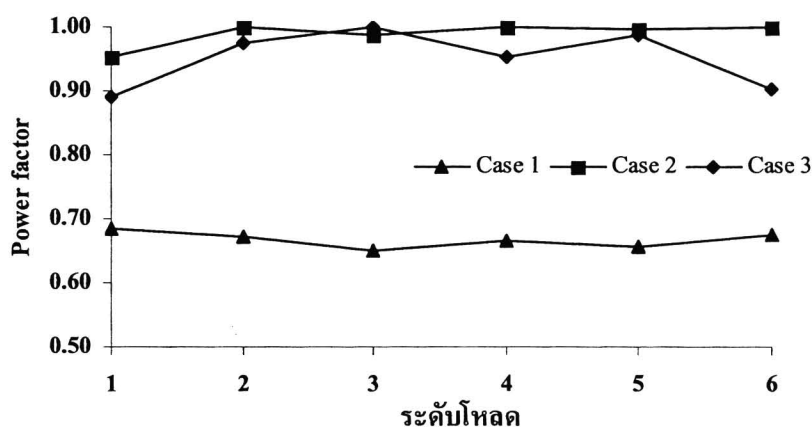
ภาพที่ 8-5 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 8-6 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 2



ภาพที่ 8-7 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 3



ภาพที่ 8-8 ค่าตัวประกอบกำลังของกรณีศึกษาทั้งสาม

ในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 6,905 kWh/วัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 8-2 พบว่า ขนาดแรงดันที่บางบัสในทุกระดับโหลดมีค่าต่ำกว่า 0.95 pu โดยเฉพาะในระดับโหลดที่มีความต้องการโหลดสูง (เช่น ระดับโหลดที่ 3 และระดับโหลดที่ 5) ขนาดแรงดันที่บางบัสมีค่าต่ำกว่า 0.85 pu ส่วนภาพที่ 8-5 แสดงให้เห็นว่า ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจากทุกระดับโหลดมีค่าประมาณร้อยละ 8-20 และจากภาพที่ 8-8 ก็จะเห็นได้ว่า ตัวประกอบกำลังของระบบในทุกระดับโหลดมีค่าประมาณ 0.65-0.68 ดังนั้น ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และค่าตัวประกอบกำลังของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟจึงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนด

ภาพที่ 8-3 ภาพที่ 8-4 และภาพที่ 8-8 แสดงให้เห็นว่า การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 สามารถปรับปรุงขนาดแรงดันบัสและค่าตัวประกอบกำลังของระบบในทุกระดับโหลดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ สำหรับความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน การควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 ทำได้เพียงแค่ช่วยให้ลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 เท่านั้น แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าร้อยละ 5 (ดูภาพที่ 8-6) ส่วนการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 3 สามารถลดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันให้ต่ำกว่าร้อยละ 5 (ดูภาพที่ 8-7)

เมื่อเปรียบเทียบตารางการทำงานของ การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 (พิจารณาจากตารางที่ 8-5 และตารางที่ 8-6) พบว่า การควบคุมในกรณีศึกษาที่ 3 ต้องต่อตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยและตัวเก็บประจุในสายป้อนเข้าสู่ระบบมากกว่าการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 และเนื่องจากตัวเก็บประจุในสายป้อนมีผลต่อการเพิ่มขนาดแรงดันบัส เมื่อการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 3 มีการต่อตัวเก็บประจุในสายป้อนเข้าสู่ระบบมากกว่า ตัวเปลี่ยนจุดแยก

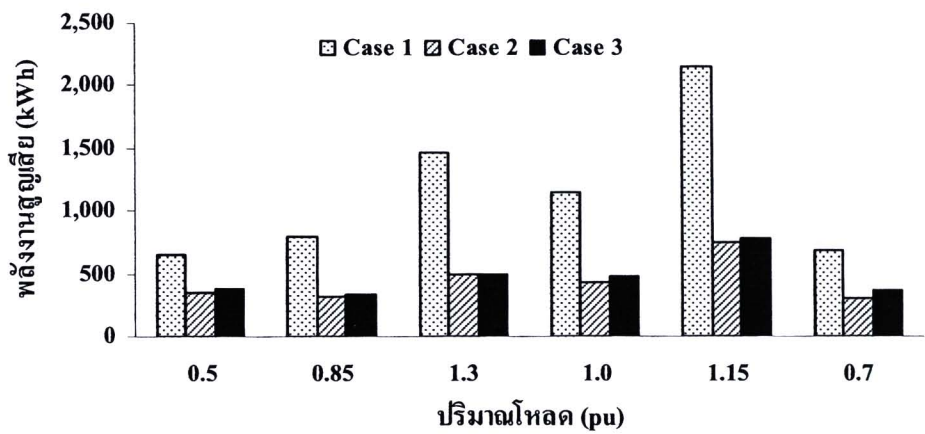
หม้อแปลงของการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 3 จึงถูกปรับตั้งให้อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง คือ การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟตามตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดของกรณีศึกษาทั้งสองได้ทำให้เงื่อนไขบังคับจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุในสายป้อนมีลักษณะผูกมัด (Binding) กล่าวคือ ตัวเก็บประจุในสายป้อนทุกตัวได้เปลี่ยนสถานะการทำงานจนครบตามจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนดไว้ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากค่ากำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุในสายป้อนมีผลอย่างมากต่อขนาดแรงดันบัส ดังนั้น เพื่อให้ขนาดแรงดันบัสสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด ตัวเก็บประจุในสายป้อนทุกตัวจึงต้องเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเองให้สัมพันธ์กับปริมาณโหลดในแต่ละช่วงเวลาให้มากที่สุด

นอกจากประโยชน์ในการปรับปรุงขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและค่าตัวประกอบกำลังของระบบ การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟยังช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าลดลงตามรายละเอียดในตารางที่ 8-7 และภาพที่ 8-9 การควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 2,634 kWh/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 เท่ากับ 4,270 kWh/วัน (ร้อยละ 61.85) ส่วนการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 3 ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 2,829 kWh/วัน ซึ่งสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 2 เล็กน้อย แต่ลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณ 4,075 kWh/วัน (ร้อยละ 59.03) เมื่อพิจารณาแยกแต่ละระดับโหลด จะเห็นได้ว่าการควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 3 ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลงได้มากในระดับ โหลดซึ่งมีความต้องการโหลดสูง (เช่น ระดับโหลดที่ 3 และระดับโหลดที่ 5)

ตารางที่ 8-7 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของทุกกรณีศึกษา

ระดับ โหลดที่	ปริมาณ โหลด (pu)	พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh)			ร้อยละที่ลดลง (%)	
		กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3	กรณีศึกษาที่ 2	กรณีศึกษาที่ 3
1	0.5	657.15	356.60	387.02	45.74	41.11
2	0.85	791.06	311.94	332.71	60.57	58.07
3	1.3	1,467.69	490.48	487.54	66.58	66.78
4	1.0	1,153.13	427.36	478.92	62.94	58.47
5	1.15	2,153.50	750.34	781.76	65.16	63.70
6	0.7	682.23	297.33	362.05	56.42	46.93
รวม		6,904.76	2,634.05	2,829.00	61.85	59.03



ภาพที่ 8-9 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งสาม

ผลการศึกษาที่ได้แสดงถึงประโยชน์ของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟซึ่งช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบ รวมทั้งช่วยปรับปรุงขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และตัวประกอบกำลังของระบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด

8.2 การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟแบบหลายจุดประสงค์

8.2.1 บทนำ

การศึกษาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในหัวข้อ 8.1 มีวัตถุประสงค์เพียงประการเดียวคือ ต้องการให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด และพิจารณาหัวข้อต่างๆ ได้แก่ ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ รวมทั้งจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อนว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขบังคับหรือไม่เท่านั้น แต่ไม่ได้พิจารณาว่าหัวข้อเหล่านั้นผ่านเกณฑ์ของเงื่อนไขบังคับในระดับใด (เช่น ดีมาก ดี หรือปานกลาง) การศึกษาในหัวข้อนี้ได้นำระดับการผ่านเกณฑ์ของเงื่อนไขบังคับมารวมไว้ในฟังก์ชันจุดประสงค์ โดยตารางการทำงานเหมาะที่สุดของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ นอกจากทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุดแล้ว ยังต้องทำให้หัวข้อที่พิจารณาผ่านเกณฑ์ของเงื่อนไขบังคับที่กำหนดไว้ในระดับดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

อย่างไรก็ตาม คำว่า “ระดับดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้” เป็นนิพจน์ทางภาษา (Linguistic Expression) ซึ่งมีความคลุมเครือไม่แน่นอนและไม่ได้มีค่าเป็นตัวเลข จึงไม่สามารถคำนวณด้วยตัว

ดำเนินการทางคณิตศาสตร์ใดๆ ถ้าต้องการคำนวณก็จำเป็นต้องแปลงให้เป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Expression) ซึ่งให้ค่าเป็นตัวเลข การแปลงนิพจน์ทางภาษาเป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ทำได้โดยใช้ทฤษฎีเซตฟัซซี (Fuzzy Set Theory) ซึ่งสามารถเปลี่ยนข้อมูลที่มีความคลุมเครือไม่แน่นอนให้เป็นค่าตัวเลข

เนื้อหาในหัวข้อนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวร่วมกับทฤษฎีเซตฟัซซี เพื่อกำหนดตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน สำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายซึ่งมีโหลดไม่เชิงเส้นต่ออยู่ หัวข้อที่นำมาพิจารณาในฟังก์ชันจุดประสงค์ประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมทั้งหมด ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยกำหนดให้ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสมดุล

8.2.2 แนวคิดเบื้องต้นของทฤษฎีเซตฟัซซี

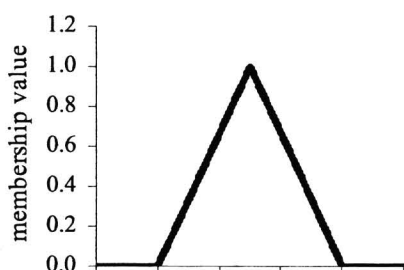
ทฤษฎีเซตฟัซซี (Zadeh, 1965) ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้อธิบายความไม่แน่นอนของข้อมูลต่างๆ โดยเปลี่ยนข้อมูลเหล่านั้นเป็นตัวเลขทางคณิตศาสตร์ ลักษณะของเซตฟัซซีถูกกำหนดโดยค่าภาวะสมาชิก (Membership Value) เพื่อบอกถึงความคล้ายกันของข้อมูลที่ไม่สามารถระบุคุณสมบัติได้อย่างแน่นอน โดยค่าภาวะสมาชิกสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันภาวะสมาชิก (Membership Function) ที่กำหนดขึ้นสำหรับเซตฟัซซีใดๆ (Jang, Sun and Mizutani, 1997)

เซตแบบฉบับ (Classical Sets) หรือเซตทวินัย (Crisp Sets) เป็นเซตที่มีขอบทวินัย (Crisp Boundary) ซึ่งแบ่งกลุ่มสิ่งที่มีลักษณะเหมือนกันตามนิยามของเซตนั้นๆ เพื่อแยกสิ่งต่างๆ ในเอกภพของสรรพสาระ (Universe of Discourse) ด้วยการกำหนดฟังก์ชันลักษณะเฉพาะ (Characteristic Function) ให้กับสมาชิกแต่ละตัวในเซต การแบ่งกลุ่มของสมาชิกภายในเซตจะเป็นไปอย่างแน่นอน โดยแบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นสมาชิกของเซต และกลุ่มที่ไม่เป็นสมาชิกของเซต ค่าภาวะสมาชิกสำหรับสมาชิกแต่ละตัวในเซตมีเพียงสองค่า คือ 1 และ 0 สมาชิกที่อยู่ในกลุ่มเป็นสมาชิกของเซตจะมีค่าภาวะสมาชิกเท่ากับ 1 ส่วนสมาชิกที่อยู่ในกลุ่มไม่เป็นสมาชิกของเซตจะมีค่าภาวะสมาชิกเท่ากับ 0 การเปลี่ยนค่าภาวะสมาชิกจะเกิดขึ้นทันทีตรงขอบทวินัยซึ่งกำหนดจากนิยามของเซตนั้น

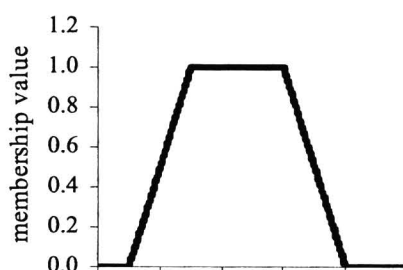
เซตฟัซซีเป็นเซตซึ่งไม่มีขอบทวินัย แต่มีการระบุระดับขั้น (Degree) เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงจากการเป็นสมาชิกของเซตไปสู่การไม่เป็นสมาชิกของเซตเกิดขึ้นอย่างเป็นระดับ โดยมีฟังก์ชันภาวะสมาชิกของเซตฟัซซีทำหน้าที่กำหนดค่าภาวะสมาชิก (ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1) ให้แก่สมาชิก

แต่ละตัว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าภาวะสมาชิกอย่างเป็นระดับทำให้เซตฟัซซีมีความยืดหยุ่นและเหมาะต่อการใช้อธิบายหรือเป็นตัวแทนของนิพจน์ทางภาษา (Jang, Sun and Mizutani, 1997)

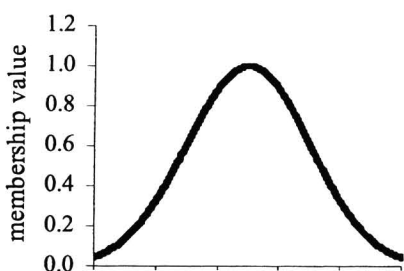
ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าภาวะสมาชิกของเซตฟัซซีซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายฟังก์ชัน อาทิ ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบเกาส์ (Gaussian Membership Function) และฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบระฆังวงนัยทั่วไป (Generalized Bell Membership Function) ตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 8-10



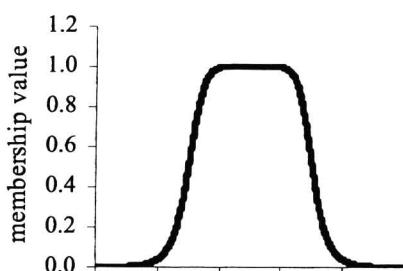
(ก) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสามเหลี่ยม



(ข) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสี่เหลี่ยมคางหมู



(ค) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบเกาส์



(ง) ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบระฆังวงนัยทั่วไป

ภาพที่ 8-10 ตัวอย่างฟังก์ชันภาวะสมาชิกในทฤษฎีเซตฟัซซี

การเลือกใช้ฟังก์ชันภาวะสมาชิกขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเซตฟัซซี ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสามเหลี่ยมและเชิงสี่เหลี่ยมคางหมู มีรูปแบบการคำนวณที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ จึงถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะกับการดำเนินการบนเวลาจริง (Real-time Implementation) ข้อด้อยของฟังก์ชันภาวะสมาชิกทั้งสอง คือ มีลักษณะไม่เรียบที่จุดมุม เนื่องจากถูกสร้างจากส่วนของเส้นตรง สำหรับฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบเกาส์และแบบระฆังวงนัยทั่วไป

เป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นเรียบ (Smooth and Nonlinear Function) ซึ่งใช้กำหนดลักษณะของเซตฟัซซีอย่างแพร่หลายเช่นกัน สมการของฟังก์ชันภาวะสมาชิกทั้งสี่ฟังก์ชัน (Jang, sun and Mizutani, 1997) มีรายละเอียดดังนี้

สมการที่ (8-15) เป็นสมการสำหรับฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสามเหลี่ยม โดยพารามิเตอร์ a , b , และ c (เมื่อ $a < b < c$) เป็นตัวระบุพิกัดค่า x ของมุมทั้งสามมุม

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (8-15)$$

สมการที่ (8-16) เป็นสมการสำหรับฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยพารามิเตอร์ a , b , c และ d (เมื่อ $a < b < c < d$) เป็นตัวระบุพิกัดค่า x ของมุมทั้งสี่มุม

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (8-16)$$

สมการที่ (8-17) เป็นสมการสำหรับฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบเกาส์ โดยพารามิเตอร์ c เป็นตัวกำหนดศูนย์กลางของฟังก์ชันภาวะสมาชิก (Center of Membership Function) ส่วนพารามิเตอร์ σ เป็นตัวกำหนดความกว้างของฟังก์ชันภาวะสมาชิก (Width of Membership Function)

$$\text{gaussian}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (8-17)$$

สมการที่ (8-18) เป็นสมการของฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบระฆังวงนัยทั่วไป โดยพารามิเตอร์ c และ σ เป็นตัวกำหนดศูนย์กลางและความกว้างของฟังก์ชันภาวะสมาชิก ส่วน b เป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าบวกซึ่งใช้ปรับความชันของฟังก์ชันภาวะสมาชิก

$$bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (8-18)$$

8.2.3 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

วัตถุประสงค์ของการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในการศึกษานี้ คือ ต้องการให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ขนาดแรงดันบั๊ส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ (ได้แก่ ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน) อยู่ในระดับดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

คำอธิบายสำหรับ “ระดับดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้” ของหัวข้อต่างๆ ข้างต้นมีรายละเอียด ดังนี้

1. พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจากทุกระดับโหลดควรมีค่าน้อยที่สุด
2. ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของขนาดแรงดันบั๊สในแต่ละระดับโหลดควรมีค่าน้อยที่สุด
3. ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในแต่ละระดับโหลดควรมีค่าน้อยที่สุด
4. ค่าตัวประกอบกำลังของระบบในแต่ละระดับโหลดควรมีค่ามากที่สุด
5. ผลรวมของจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ควรมีค่าน้อยที่สุด

ให้หาค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆ ด้วยฟังก์ชันภาวะสมาชิกในทฤษฎีเซตฟัซซี แล้วนำมาคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าภาวะสมาชิกจากหัวข้อต่างๆ ตามสมการต่อไปนี้

$$Max J = \mu_E + \mu_V + \mu_{THD} + \mu_{pf} + \mu_{SW} \quad (8-19)$$

เงื่อนไขบังคับ ได้แก่ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบั๊ส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ จำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน รวมทั้งขอบเขตสถานะการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสาม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (8-20)$$

$$Q_i^j = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (8-21)$$

$$V^{\min} \leq \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_i^{h,j}|^2} \leq V^{\max} \quad (8-22)$$

$$THD_{V,i}^j \leq THD_V^{\max} \quad (8-23)$$

$$|pf_{sys}^j| \geq pf_{sys}^{\min} \quad (8-24)$$

$$N_{tap} = \sum_{j=1}^S \left| Tap^j - Tap^{j-1} \right| \leq N_{tap}^{\max} \quad (8-25)$$

$$N_{CS,m} = \sum_{j=1}^S \left| CS_m^j - CS_m^{j-1} \right| \leq N_{CS}^{\max} \quad (8-26)$$

$$N_{CF,n} = \sum_{j=1}^S \left| CF_n^j - CF_n^{j-1} \right| \leq N_{CF}^{\max} \quad (8-27)$$

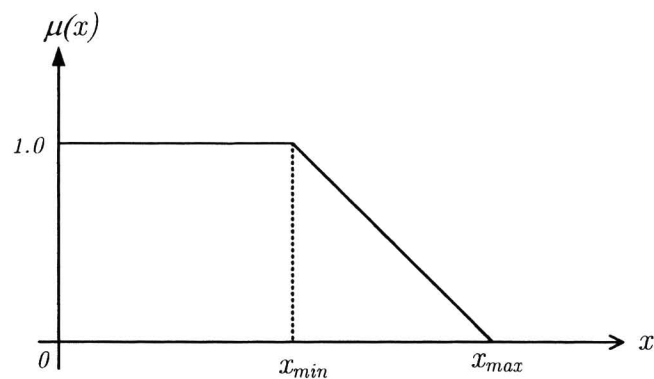
$$Tap^{\min} \leq Tap^j \leq Tap^{\max} \quad (8-28)$$

$$0 \leq CS_m^j \leq CS_m^{\max} \quad (8-29)$$

$$0 \leq CF_n^j \leq CF_n^{\max} \quad (8-30)$$

8.2.4 การกำหนดฟังก์ชันภาวะสมาชิก

การศึกษาครั้งนี้ใช้ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเชิงสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งมีลักษณะตามภาพที่ 8-11 เพื่อคำนวณค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆที่ต้องการพิจารณา ค่าภาวะสมาชิกจะเท่ากับ 1 เมื่อ x มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $x_{\min}$ จากนั้น ค่าภาวะสมาชิกจะลดลงอย่างเชิงเส้นเมื่อ x มีค่าอยู่ระหว่าง $x_{\min}$ และ $x_{\max}$ และค่าภาวะสมาชิกจะเท่ากับ 0 เมื่อ x มีค่ามากกว่า $x_{\max}$ สมการฟังก์ชันภาวะสมาชิกจึงเขียนได้ดังสมการที่ (8-31)



ภาพที่ 8-11 ฟังก์ชันภาวะสมาชิกที่ใช้ในการคำนวณ

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0, & x \geq x_{\max} \end{cases} \tag{8-31}$$

การกำหนดค่า x สำหรับตารางการทำงานที่ k เพื่อใช้คำนวณค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของขนาดแรงดันบัส ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม มีรายละเอียดดังนี้

$$x_E^k = \frac{\sum_{j=1}^S T^j P_L^{j,k}}{\sum_{j=1}^S T^j P_L^{j,0}} \tag{8-32}$$

$$x_V^k = \frac{\sum_{j=1}^S (V_{\max}^{j,k} - V_{\min}^{j,k})}{(V^{\max} - V^{\min}) \times S} \tag{8-33}$$

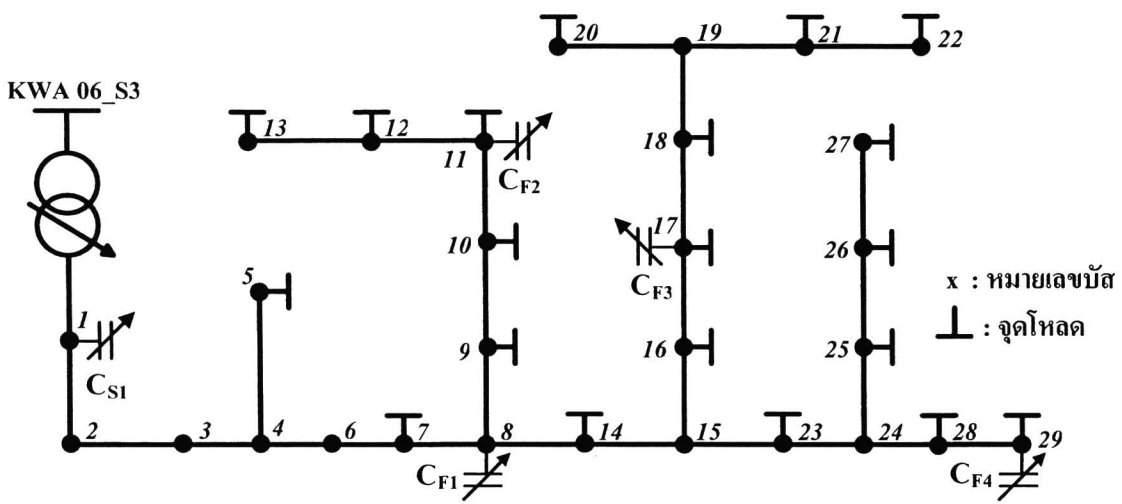
$$x_{THD}^k = \frac{\sum_{j=1}^S THD_{V,\max}^{j,k}}{THD_V^{\max} \times S} \tag{8-34}$$

$$x_{pf}^k = \frac{\sum_{j=1}^S (1 - |pf_{sys}^{j,k}|)}{(1 - pf_{sys}^{\min}) \times S} \tag{8-35}$$

$$x_{SW}^k = \frac{N_{tap}^k + N_{CS}^k + N_{CF}^k}{N_{tap}^{\max} + N_{CS}^{\max} + N_{CF}^{\max}} \tag{8-36}$$

8.2.5 ข้อมูลแบบจำลองระบบจำหน่าย

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากวงจรสายป้อน KWA06 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สมชาย, 2549) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3 ข้อมูลสายป้อนเป็นข้อมูลเดิมของระบบตามรายละเอียดในตารางที่ 8-8 การดัดแปลงอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษารังนี้ ประกอบด้วย การกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งทำให้โครงสร้างของระบบมีลักษณะตามภาพที่ 8-12 และการกำหนดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงรวมทั้งร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด ซึ่งมีรายละเอียดในตารางที่ 8-9 ทั้งนี้ ความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้คำนวณจากค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสนั้น โดยใช้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.7 แบบถ้าหลัง



ภาพที่ 8-12 ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3

ตารางที่ 8-8 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3

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 8-9 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3

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	30	20	100	30
6	-	-	21	130	30
7	310	30	22	100	30
8	-	-	23	290	30
9	400	30	24	-	-
10	85	30	25	100	30
11	425	30	26	150	30
12	175	30	27	150	30
13	240	30	28	125	30
14	100	30	29	160	30
15	-	-			

8.2.6 ข้อมูลการคำนวณ

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 22 kV และ 100 MVA ระดับโหลดในหนึ่งวันแบ่งเป็น 6 ระดับตามรายละเอียดในตารางที่ 8-10 โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางมีค่าเท่ากับความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด อันดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา ได้แก่ อันดับ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25

กำหนดให้ตำแหน่งปรับตั้งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงมีทั้งหมด 17 ตำแหน่ง กล่าวคือ $Tap^j \in \{-8, -7, \dots, -1, 0, 1, \dots, 7, 8\}$ โดยสามารถปรับแรงดันที่บัสต้นทางให้อยู่ในช่วง -5% ถึง 5% ของขนาดแรงดัน 1.0 pu รายละเอียดของตัวเก็บประจุทั้งหมดซึ่งติดตั้งในระบบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8-11

สำหรับเงื่อนไขบังคับ กำหนดให้ $V^{\min}$ และ $V^{\max}$ มีค่าเท่ากับ 0.95 pu และ 1.05 pu ค่าของ $THD_V^{\max}$ และ $pf_{sys}^{\min}$ เท่ากับ 5% และ 0.85 ส่วนจำนวนครั้งสูงสุดในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ $N_{tap}^{\max}$ สำหรับตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงเท่ากับ 10 ครั้ง $N_{CS}^{\max}$ สำหรับตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละตัวเท่ากับ 8 ครั้ง และ $N_{CF}^{\max}$ สำหรับตัวเก็บประจุในสายป้อนแต่ละตัวเท่ากับ 4 ครั้ง

สำหรับการคำนวณค่าภาวะสมาชิกของพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม ได้กำหนดให้ $x_{\min}$ และ $x_{\max}$ ในฟังก์ชันภาวะสมาชิกมีค่าเท่ากับ 0.2 และ 1.0 ตามลำดับ

ตารางที่ 8-10 ข้อมูลระดับโหลดสำหรับแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3

ระดับโหลดที่	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 วัน (ชั่วโมง)
1	0.6	8
2	0.75	3
3	1.25	2
4	0.9	3
5	1.1	4
6	1.0	4

ตารางที่ 8-11 ข้อมูลตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S3

ตำแหน่งของตัวเก็บประจุ	ขนาดชั้น (kVAr)	จำนวนชั้นที่ติดตั้ง
ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย		
ชุดที่ 1	100	3
ตัวเก็บประจุในสายป้อน		
บัสหมายเลข 8	300	6
บัสหมายเลข 11	300	6
บัสหมายเลข 17	300	6
บัสหมายเลข 29	300	6

8.2.7 พารามิเตอร์ของวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัว

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

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

(8-37)

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0

8.2.8 กรณีศึกษาที่พิจารณา

พิจารณาเปรียบเทียบการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟระหว่างสองกรณีศึกษา คือ

กรณีศึกษาที่ 1: กำหนดตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดโดยต้องการให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจากทุกระดับโหลดมีค่าน้อยที่สุด

กรณีศึกษาที่ 2: กำหนดตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ระบุไว้ในสมการที่ (8-19)

8.2.9 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

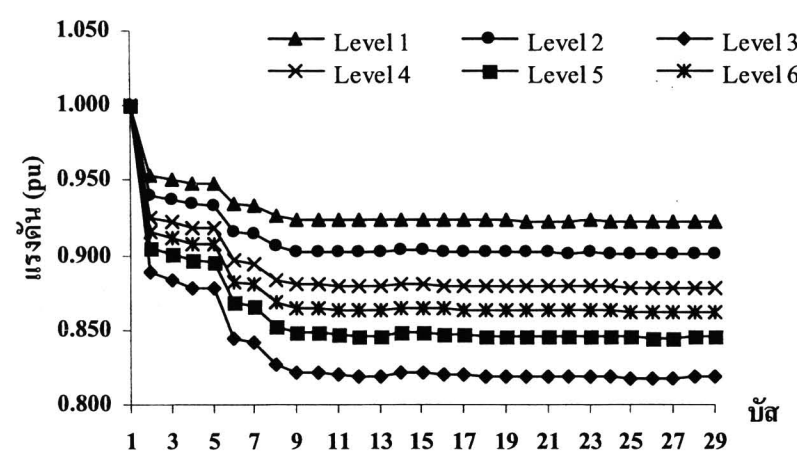
ข้อมูลของระบบเมื่อ ไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟมีรายละเอียดตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 8-12 รวมทั้ง ภาพที่ 8-13 และภาพที่ 8-14 ซึ่งพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจากทุกระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 7,118 kWh/วัน เมื่อพิจารณาขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

ของแรงดัน และค่าตัวประกอบกำลังของระบบ พบว่า ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยในทุก
ระดับโหลดมีบัสซึ่งขนาดแรงดันมีค่าต่ำกว่า 0.95 pu ส่วนความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันจาก
ทุกระดับโหลดมีค่าประมาณร้อยละ 3-11 และตัวประกอบกำลังของระบบจากทุกระดับโหลดมีค่า
เพียง 0.66-0.68

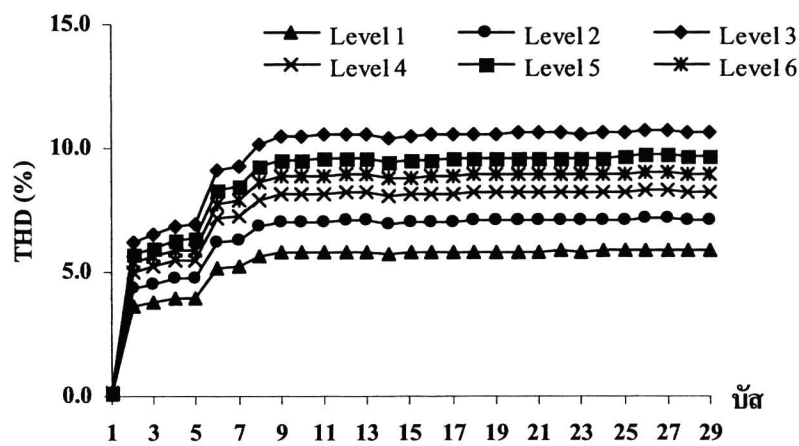
เมื่อมีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ ตารางการทำงานของกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษา
ที่ 2 มีรายละเอียดตามตารางที่ 8-13 และตารางที่ 8-14 ส่วนการสรุปและเปรียบเทียบผลการควบคุม
ของกรณีศึกษาทั้งสองได้แสดงไว้ตารางที่ 8-15 ถึงตารางที่ 8-18 และภาพที่ 8-15 ถึงภาพที่ 8-18

ตารางที่ 8-12 ข้อมูลของระบบเมื่อ ไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ

หัวข้อที่พิจารณา	ระดับโหลดที่					
	1	2	3	4	5	6
1) พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh)	950.40	583.03	1,302.76	882.53	1,893.63	1,505.90
2) ขนาดแรงดันต่ำสุดที่บัสใดๆ (pu)	0.9221	0.9004	0.8168	0.8774	0.8442	0.8612
3) ขนาดแรงดันสูงสุดที่บัสใดๆ (pu)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4) ผลต่างระหว่างแรงดันสูงสุดและต่ำสุด (pu)	0.0779	0.0996	0.1832	0.1226	0.1558	0.1388
5) ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันที่บัสใดๆ (%)	5.90	7.15	10.73	8.31	9.73	9.04
6) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ	0.68	0.67	0.65	0.67	0.66	0.66



ภาพที่ 8-13 ขนาดแรงดันบัสเมื่อ ไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ



ภาพที่ 8-14 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ

ตารางที่ 8-13 ตารางการทำงานของกรณีศึกษาที่ 1

อุปกรณ์	ระดับโหลดที่						จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	7	7	7	7	7	7	0
2) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย							
ชุดที่ 1	1	1	2	2	2	2	2
3) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน							
บัสหมายเลข 8	3	3	4	4	3	4	4
บัสหมายเลข 11	2	3	4	4	4	3	4
บัสหมายเลข 17	2	2	3	3	3	4	4
บัสหมายเลข 29	2	3	4	4	4	3	4

ตารางที่ 8-14 ตารางการทำงานของกรณีศึกษาที่ 2

อุปกรณ์	ระดับโหลดที่						จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	6	6	6	6	6	6	0
2) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย							
ชุดที่ 1	1	1	1	1	1	1	0
3) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน							
บัสหมายเลข 8	3	3	3	3	3	3	0
บัสหมายเลข 11	4	4	5	5	5	5	2
บัสหมายเลข 17	3	3	4	4	4	4	2
บัสหมายเลข 29	3	3	4	4	4	4	2

ตารางที่ 8-15 ผลการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟของกรณีศึกษาที่ 1

หัวข้อที่พิจารณา	ระดับโหลดที่					
	1	2	3	4	5	6
1) พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh)	412.08	234.61	449.01	354.70	678.05	554.26
2) ขนาดแรงดันต่ำสุดที่บัสใดๆ (pu)	1.0294	1.0234	0.9849	1.0298	0.9984	1.0109
3) ขนาดแรงดันสูงสุดที่บัสใดๆ (pu)	1.0438	1.0438	1.0438	1.0438	1.0438	1.0438
4) ผลต่างระหว่างแรงดันสูงสุดและต่ำสุด (pu)	0.0144	0.0204	0.0589	0.0140	0.0454	0.0329
5) ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันที่บัสใดๆ (%)	4.10	3.30	3.45	2.29	3.30	2.92
6) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ	0.99	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99

ตารางที่ 8-16 ผลการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟของกรณีศึกษาที่ 2

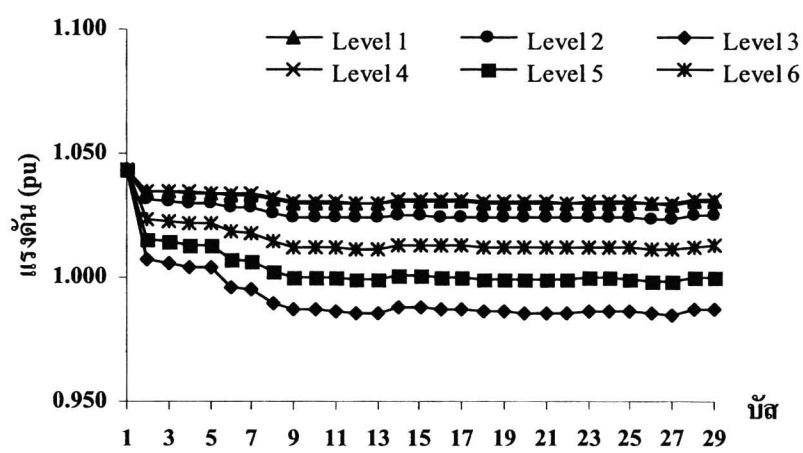
หัวข้อที่พิจารณา	ระดับโหลดที่					
	1	2	3	4	5	6
1) พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh)	563.09	255.68	447.67	376.61	685.17	580.66
2) ขนาดแรงดันต่ำสุดที่บัสใดๆ (pu)	1.0375	1.0292	0.9849	1.0296	1.0045	1.0172
3) ขนาดแรงดันสูงสุดที่บัสใดๆ (pu)	1.0483	1.0375	1.0375	1.0375	1.0375	1.0375
4) ผลต่างระหว่างแรงดันสูงสุดและต่ำสุด (pu)	0.0108	0.0008	0.0526	0.0079	0.033	0.0203
5) ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันที่บัสใดๆ (%)	1.84	2.38	3.10	2.05	2.62	2.33
6) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ	0.85	0.96	0.99	0.96	0.99	0.99

ตารางที่ 8-17 เปรียบเทียบผลการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ

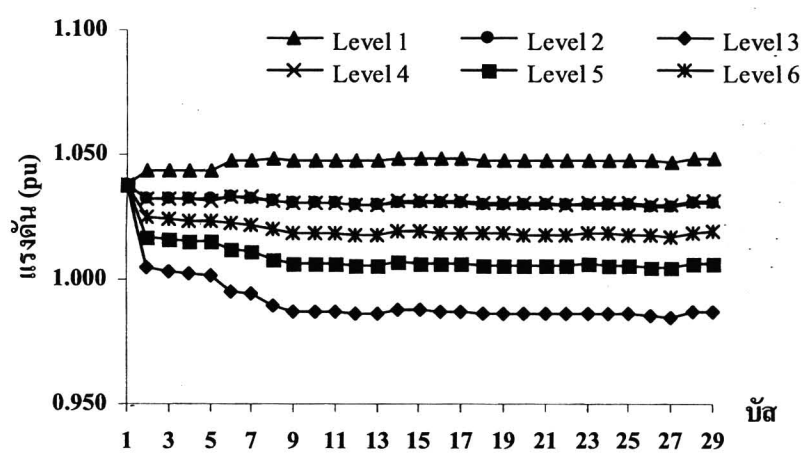
หัวข้อที่พิจารณา	ไม่ควบคุม	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2
1) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลด (kWh)	7,118.25	2,682.71	2,908.87
2) ผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันบัสสูงสุดและ แรงดันต่ำสุดในทุกระดับโหลด (pu)	0.7779	0.1860	0.1254
3) ผลรวมของค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของ แรงดันในทุกระดับโหลด (%)	50.86	19.36	14.32
4) ผลรวมของค่าตัวประกอบกำลังของระบบในทุกระดับโหลด	3.99	5.91	5.74
5) ผลรวมของจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของ อุปกรณ์ควบคุมทั้งหมด	-	18	6

ตารางที่ 8-18 ค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆในกรณีศึกษาทั้งสอง

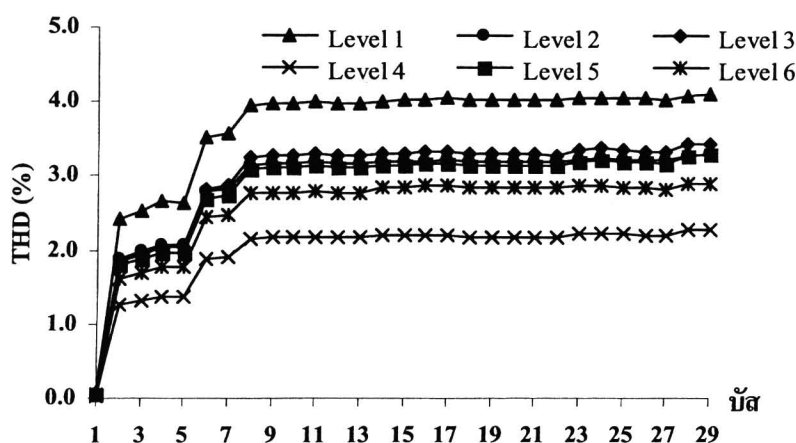
หัวข้อที่พิจารณา	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2
1) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ	0.7789	0.7392
2) ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแรงดันบัส	0.8631	0.9733
3) ค่าสูงสุดของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน	0.4434	0.6535
4) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ	1	0.9154
5) จำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม	0.5882	1



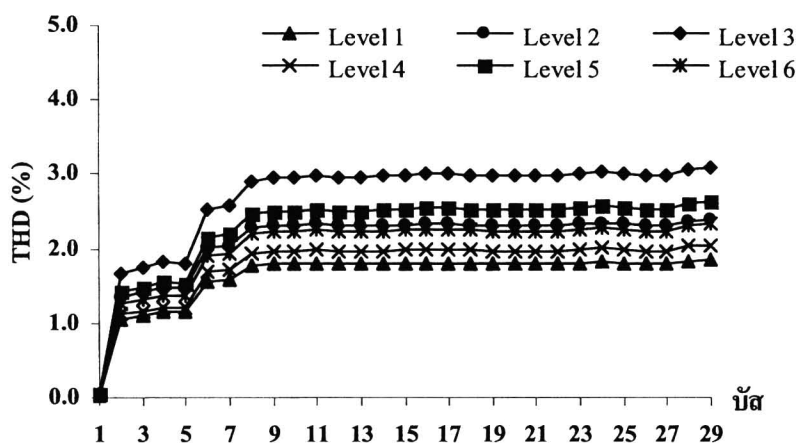
ภาพที่ 8-15 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 8-16 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 2



ภาพที่ 8-17 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 8-18 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันในกรณีศึกษาที่ 2

การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ที่แตกต่างกันในกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 ส่งผลต่อตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ และมีข้อสังเกต 2 ข้อเกี่ยวกับการปรับตั้งตำแหน่งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ข้อสังเกตแรก คือ ตำแหน่งปรับตั้งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงของกรณีศึกษาทั้งสองอยู่ในตำแหน่งสูง โดยตำแหน่งปรับตั้งในกรณีศึกษาที่ 1 มีค่าสูงกว่าในกรณีศึกษาที่ 2 อยู่หนึ่งขั้น ส่วนข้อสังเกตประการที่สอง คือ ตำแหน่งปรับตั้งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงของทั้งสองกรณีศึกษาอยู่ที่ตำแหน่งเดิมในทุกระดับโหลด การที่ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงได้ถูกปรับตั้งให้มีค่าสูงและอยู่ที่ตำแหน่งเดิมตลอด มีสาเหตุมาจากเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ ขนาดแรงดันบัสมักมีค่าต่ำมากในทุกระดับโหลด การเพิ่มขนาดแรงดันบัสมักให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ จำเป็นต้องยกระดับขนาดแรงดันบัสด้านทางให้มีค่า

เพิ่มขึ้น ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงจึงถูกปรับตั้งให้อยู่ในตำแหน่งซึ่งมีค่าสูงและคงตำแหน่งนั้นไว้ในทุกระดับโหลด ส่วนการที่ตำแหน่งปรับตั้งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงในกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าต่ำกว่าการปรับตั้งในกรณีศึกษาที่ 1 เป็นเพราะการกำหนดตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดในกรณีศึกษาที่ 2 ได้นำความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของขนาดแรงดันบัสในแต่ละระดับโหลดมาร่วมพิจารณาด้วย ตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดในกรณีศึกษาจึงพยายามไม่ยกระดับขนาดแรงดันให้มีค่าสูงมากเกินไป

เมื่อพิจารณาสถานะการทำงานที่ระดับโหลดต่างๆ ของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งต้องการทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด ตัวเก็บประจุทั้งสองได้เปลี่ยนสถานะการทำงานตามปริมาณโหลดในแต่ละระดับโหลดโดยไม่คำนึงถึงจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสถานะการทำงาน ทั้งนี้ ตัวเก็บประจุในสายป้อนทุกตัวได้เปลี่ยนสถานะการทำงานจนครบตามจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนด แต่ในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมได้ถูกพิจารณาในฟังก์ชันจุดประสงค์ด้วย ตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดจึงได้พยายามจำกัดการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุในสายป้อนให้น้อยที่สุด โดยเมื่อตัวเก็บประจุในสายป้อนได้ถูกปรับสถานะการทำงานให้สอดคล้องกับปริมาณโหลดสูงสุดในระดับโหลดที่ 3 แล้ว ก็จะคงสถานะการทำงานนั้นไว้ตลอดไป

การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลง และช่วยปรับปรุงขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2,683 kWh/วัน และ 2,909 kWh/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีไม่มีการควบคุมร้อยละ 62.31 และร้อยละ 59.13 ตามลำดับ การที่พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 มีค่ามากกว่ากรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากได้นำระดับการผ่านเกณฑ์ของเงื่อนไขบังคับมารวมไว้ในฟังก์ชันจุดประสงค์ การกำหนดตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดจึงต้องพิจารณาระดับการผ่านเกณฑ์เพิ่มเติมนอกเหนือจากการทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด การเปรียบเทียบผลการควบคุมและค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 จะมีค่าสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 แต่ขนาดแรงดันบัส ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และจำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขบังคับด้วยระดับที่ดีกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการที่ขนาดแรงดันที่แต่ละบัสในแต่ละระดับโหลดมีความสม่ำเสมอกันมากกว่า ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันในแต่ละระดับโหลดมีค่าต่ำกว่า

และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เปลี่ยนสถานะการทำงานด้วยจำนวนครั้งที่น้อยกว่า มีเพียงค่าตัวประกอบกำลังของระบบเท่านั้น ที่การผ่านเกณฑ์ในกรณีศึกษาที่ 1 อยู่ในระดับที่ดีกว่ากรณีศึกษาที่ 2

การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟแบบหลายจุดประสงค์ในกรณีศึกษาที่ 2 ให้ความสำคัญแก่หัวข้อต่างๆ ในฟังก์ชันจุดประสงค์อย่างเท่าเทียมกัน แต่ถ้าต้องการให้ความสนใจในหัวข้อใดมากกว่าหัวข้ออื่น ก็สามารทำได้โดยการถ่วงน้ำหนัก (Weight) โดยกำหนดตัวประกอบการถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor) ตามที่ต้องการ แล้วนำไปคูณกับค่าภาวะสมาชิกของหัวข้อต่างๆ ในฟังก์ชันจุดประสงค์