

บทที่ 9

การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่าย ที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

9.1 บทนำ

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generations) คือ แหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย โดยทั่วไป นิยามของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว หมายถึง แหล่งผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังผ่านจุดต่อร่วม (IEEE Std 1547, 2003) หรือหมายถึง แหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (พิกัดประมาณ 15-10,000 kW) ซึ่งติดตั้งในระบบไฟฟ้าทั้งในพื้นที่ของผู้ให้บริการไฟฟ้า (Utilities) หรือในพื้นที่ของผู้ใช้ไฟฟ้า (Willis and Scott, 2000) ปัจจุบัน การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความนิยมนำมาขึ้น เนื่องจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องวางแผนล่วงหน้าระยะยาว อีกทั้งยังต้องใช้เงินลงทุนและพื้นที่จำนวนมากในการก่อสร้าง สำหรับประเทศไทย แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีความเกี่ยวข้องกับนโยบายของรัฐบาลด้านการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer; SPP) และผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (Very Small Power Producer; VSPP) นโยบายดังกล่าวช่วยแบ่งเบาภาระการลงทุนของรัฐในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการขยายระบบผลิต ระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กและรายเล็กมากใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้า เพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ

การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการทำงานของระบบในหลายด้าน (Jenkins et al., 2008) เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ขนาดแรงดันบัลคุณภาพกำลังไฟฟ้า ระดับความผิดปกติ (Fault Levels) และการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน รวมทั้งความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของระบบ (System Reliability and Stability) ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสมรรถนะและการทำงานของระบบจะเป็นไปในทางบวกหรือลบ ขึ้นกับคุณลักษณะของระบบจำหน่าย รวมทั้งคุณลักษณะของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (เช่น ขนาดและตำแหน่งของการติดตั้ง ลักษณะการทำงาน) ประเด็นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง คือ โดยปกติ กำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลจะไหลในทิศทางเดียวจากสถานีไฟฟ้าย่อยไปยังจุดโหลดต่างๆ แต่เมื่อติดตั้ง

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบ กำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้ในสองทิศทาง ซึ่งทำให้ขนาดแรงดันบัสเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งกระทบต่อการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟของระบบ โดยอาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุในสายป้อน (Brady, Dai and Baghzouz, 2003) ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องประสานการทำงานระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ให้เหมาะสม เพื่อป้องกันและแก้ไขผลกระทบจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีต่อการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวเพื่อกำหนดตารางเหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ โดยประสานการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุในสายป้อน และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ระบบที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยกำหนดให้ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสมดุล

9.2 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ

ฟังก์ชันจุดประสงค์สำหรับการศึกษาครั้งนี้ พิจารณาจากมุมมองของผู้ดำเนินงานระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System Operators) ซึ่งในกรณีของประเทศไทย ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ฟังก์ชันจุดประสงค์จะคำนึงถึงมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และค่าใช้จ่ายในการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กหรือรายเล็กมากซึ่งเป็นเจ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟต้องทำให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งสองในหนึ่งวันมีค่าน้อยที่สุด

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^S k_e^j T^j P_L^j + \sum_{g=1}^{ndg} \sum_{j=1}^S c_g^j T^j P_{DG,g}^j \quad (9-1)$$

เงื่อนไขบังคับ ได้แก่ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ขนาดแรงดันบัส ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ จำนวนครั้งในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน ขอบเขตสถานะการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสาม และเพิ่มเติมเงื่อนไขบังคับของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ได้แก่ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่สามารถผลิตได้ รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังในขณะทำงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$P_i^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \cos(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (9-2)$$

$$Q_i^j = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{NB} \left| V_i^j V_n^j Y_{in} \right| \sin(\theta_{in} + \theta_n^j - \theta_i^j) \quad (9-3)$$

$$V^{\min} \leq |V_i^j| \leq V^{\max} \quad (9-4)$$

$$|pf_{sys}^j| \geq pf_{sys}^{\min} \quad (9-5)$$

$$N_{tap} = \sum_{j=1}^S \left| Tap^j - Tap^{j-1} \right| \leq N_{tap}^{\max} \quad (9-6)$$

$$N_{CS,m} = \sum_{j=1}^S \left| CS_m^j - CS_m^{j-1} \right| \leq N_{CS}^{\max} \quad (9-7)$$

$$N_{CF,n} = \sum_{j=1}^S \left| CF_n^j - CF_n^{j-1} \right| \leq N_{CF}^{\max} \quad (9-8)$$

$$Tap^{\min} \leq Tap^j \leq Tap^{\max} \quad (9-9)$$

$$0 \leq CS_m^j \leq CS_m^{\max} \quad (9-10)$$

$$0 \leq CF_n^j \leq CF_n^{\max} \quad (9-11)$$

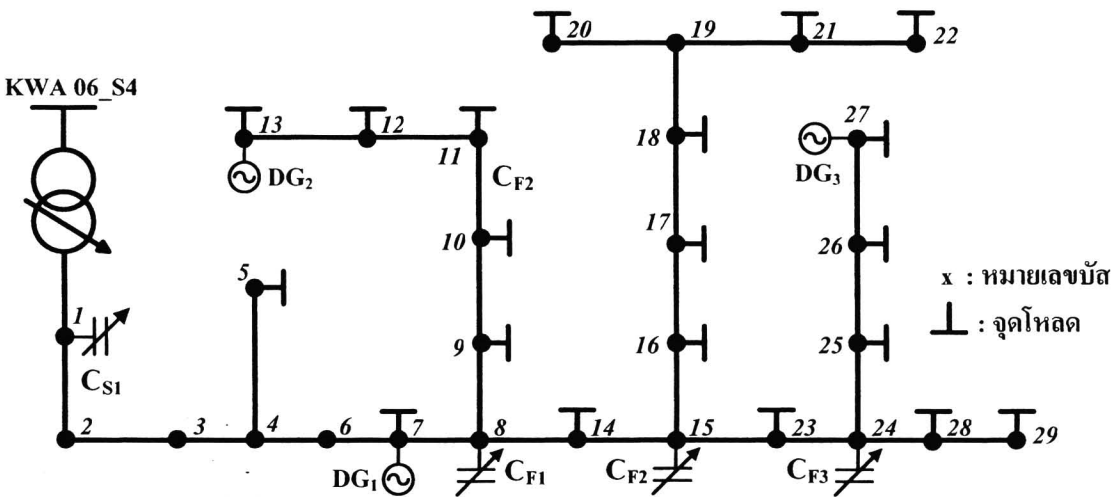
$$P_{DG,g}^{\min} \leq P_{DG,g}^j \leq P_{DG,g}^{\max} \quad (9-12)$$

$$Q_{DG,g}^{\min} \leq Q_{DG,g}^j \leq Q_{DG,g}^{\max} \quad (9-13)$$

$$|pf_{DG,g}^j| \geq pf_{DG,g}^{\min} \quad (9-14)$$

9.3 ข้อมูลแบบจำลองระบบจำหน่าย

ระบบทดสอบเป็นแบบจำลองระบบจำหน่ายซึ่งดัดแปลงจากวงจรสายป้อน KWA06 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สมชาย, 2549) โดยกำหนดชื่อเป็นแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4 ข้อมูลสายป้อนเป็นข้อมูลเดิมของระบบตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 9-1 การดัดแปลงระบบเพื่อใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยการกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุและแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (ซึ่งทำให้โครงสร้างของระบบมีลักษณะตามภาพที่ 9-1) และการกำหนดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัสต่างๆ (ตามค่าในตารางที่ 9-2) ทั้งนี้ ค่าความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลดได้คำนวณจากความต้องการกำลังจริงที่บัสนั้น โดยใช้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85 แบบล้าหลัง



ภาพที่ 9-1 ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4

9.4 ข้อมูลการคำนวณ

ค่าแรงดันฐานและค่ากำลังไฟฟ้าฐานในการคำนวณ คือ 22 kV และ 100 MVA ระดับโหลดในหนึ่งวันแบ่งเป็น 8 ระดับตามรายละเอียดในตารางที่ 9-3 โดยปริมาณโหลด 1.0 pu ในตารางมีค่าเท่ากับความต้องการโหลดซึ่งปรากฏในข้อมูลโหลด ส่วนค่า k_c^j ในแต่ละระดับโหลดได้แสดงไว้ในตารางที่ 9-3 เช่นกัน

ตารางที่ 9-1 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4

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 9-2 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4

หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)	หมายเลข บัส	ความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริง (kW)
1	-	11	531.25	21	162.5
2	-	12	218.75	22	125
3	-	13	300	23	362.5
4	-	14	125	24	-
5	500	15	-	25	125
6	-	16	156.25	26	187.5
7	387.5	17	225	27	187.5
8	-	18	181.25	28	156.25
9	500	19	-	29	200
10	106.25	20	125	-	-

กำหนดให้ตำแหน่งปรับตั้งของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงมีทั้งหมด 17 ตำแหน่ง กล่าวคือ $Tap^j \in \{-8, -7, ..., -1, 0, 1, ..., 7, 8\}$ โดยสามารถปรับแรงดันที่บัสต้นทางให้อยู่ในช่วง -5% ถึง 5% ของขนาดแรงดัน 1.0 pu รายละเอียดของตัวเก็บประจุทั้งหมดซึ่งติดตั้งในระบบได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 9-4

ในส่วนของเงื่อนไขบังคับ กำหนดให้ $V^{\min}$ และ $V^{\max}$ มีค่าเท่ากับ 0.95 pu และ 1.05 pu ค่าของ $pf_{sys}^{\min}$ เท่ากับ 0.85 ในขณะที่จำนวนครั้งสูงสุดในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ นั้น $N_{tap}^{\max}$ สำหรับตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงเท่ากับ 10 ครั้ง $N_{CS}^{\max}$ สำหรับตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละตัวเท่ากับ 8 ครั้ง และ $N_{CF}^{\max}$ สำหรับตัวเก็บประจุในสายป้อนแต่ละตัวเท่ากับ 6 ครั้ง

ข้อมูลพิกัดกำลังไฟฟ้าจริงและพิกัดกำลังรีแอกทีฟของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 9-5 โดยในขณะทำงาน แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวต้องมีค่าตัวประกอบกำลังสูงกว่า 0.85 ส่วนราคาการรับซื้อไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ระดับโหลดต่างๆ จะเท่ากับค่า k_e^j ในระดับโหลดนั้นบวกเพิ่มอีก 0.9148 บาท/kWh

ตารางที่ 9-3 ข้อมูลระดับโหลดสำหรับแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4

ระดับโหลดที่	ปริมาณโหลด (pu)	ระยะเวลาใน 1 วัน (ชั่วโมง)	k_e^j (บาท/kWh)
1	0.4	6	1.1154
2	0.6	3	1.1154
3	0.9	3	2.9278
4	1.15	3	2.9278
5	0.8	2	2.9278
6	1.1	3	2.9278
7	1.05	2	2.9278
8	0.5	2	1.1154

ตารางที่ 9-4 ข้อมูลตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในแบบจำลองระบบจำหน่าย KWA06_S4

ตำแหน่งของตัวเก็บประจุ	ขนาดชั้น (kVAr)	จำนวนชั้นที่ติดตั้ง
ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย		
ชุดที่ 1	100	5
ตัวเก็บประจุในสายป้อน		
บัสหมายเลข 8	250	6
บัสหมายเลข 15	250	6
บัสหมายเลข 24	250	6

ตารางที่ 9-5 ข้อมูลแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ตำแหน่งติดตั้ง	$P_{DG,g}^{\max}$ (kW)	$P_{DG,g}^{\min}$ (kW)	$Q_{DG,g}^{\max}$ (kVAr)	$Q_{DG,g}^{\min}$ (kVAr)
บัสหมายเลข 7	250	125	100	-50
บัสหมายเลข 13	300	150	125	-50
บัสหมายเลข 27	225	75	100	-50

9.5 การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการแก้ปัญหา

ตัวแปรตัดสินใจในปัญหาการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายซึ่งติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ได้แก่ สถานะการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในสายป้อน รวมทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเชิงปรับตัวในการค้นหาผลเฉลยเพื่อกำหนดตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุด อนุภาคแต่ละตัวจะแทนผลเฉลยด้วยลักษณะดังนี้

$$\bar{x} = [\overline{Tap} \quad \overline{CS} \quad \overline{CF} \quad \overline{P}_{DG} \quad \overline{Q}_{DG}] \tag{9-15}$$

$$\overline{Tap} = [Tap^1 \quad Tap^2 \quad .. \quad Tap^j \quad .. \quad Tap^S] \tag{9-16}$$

$$\overline{CS} = [\overline{CS}_1 \quad \overline{CS}_2 \quad .. \quad \overline{CS}_m \quad .. \quad \overline{CS}_{ncs}] \tag{9-17}$$

$$\overline{CS}_m = [CS_m^1 \quad CS_m^2 \quad .. \quad CS_m^j \quad .. \quad CS_m^S] \tag{9-18}$$

$$\overline{CF} = [\overline{CF}_1 \quad \overline{CF}_2 \quad .. \quad \overline{CF}_n \quad .. \quad \overline{CF}_{ncf}] \tag{9-19}$$

$$\overline{CF}_n = [CF_n^1 \quad CF_n^2 \quad .. \quad CF_n^j \quad .. \quad CF_n^S] \tag{9-20}$$

$$\overline{P}_{DG} = [\overline{P}_{DG,1} \quad \overline{P}_{DG,2} \quad .. \quad \overline{P}_{DG,g} \quad .. \quad \overline{P}_{DG,ndg}] \tag{9-21}$$

$$\overline{P}_{DG,g} = [P_{DG,g}^1 \quad P_{DG,g}^2 \quad \dots \quad P_{DG,g}^j \quad \dots \quad P_{DG,g}^S] \quad (9-22)$$

$$\overline{Q}_{DG} = [\overline{Q}_{DG,1} \quad \overline{Q}_{DG,2} \quad \dots \quad \overline{Q}_{DG,g} \quad \dots \quad \overline{Q}_{DG,ndg}] \quad (9-23)$$

$$\overline{Q}_{DG,g} = [Q_{DG,g}^1 \quad Q_{DG,g}^2 \quad \dots \quad Q_{DG,g}^j \quad \dots \quad Q_{DG,g}^S] \quad (9-24)$$

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

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1 r_{1d}^t (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_{2d}^t (gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (9-25)$$

ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อยมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นจาก 0.9 ในการคำนวณรอบแรกจนเหลือ 0.4 ในการคำนวณรอบสุดท้าย ส่วน c_1 และ c_2 มีค่าเท่ากับ 2.0

9.6 กรณีศึกษาที่พิจารณา

พิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบจาก 5 กรณีศึกษาต่อไปนี้

กรณีศึกษาที่ 1: ระบบไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ

กรณีศึกษาที่ 2: กำหนดตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม (ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุ) เพื่อการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟโดยยังไม่พิจารณาแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

กรณีศึกษาที่ 3: นำตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมจากกรณีศึกษาที่ 2 มาควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ โดยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งหมดจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ค่าพิกัดสูงสุดในทุกระดับโหลด

กรณีศึกษาที่ 4: ควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์ควบคุมและแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยปรับตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ แต่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งหมดยังคงจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ค่าพิกัดสูงสุดในทุกระดับโหลด

กรณีศึกษาที่ 5: กำหนดตารางการทำงานโดยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถปรับการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในแต่ละระดับโหลดให้เหมาะสมกับสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ

9.7 ผลที่ได้จากกรณีศึกษา

ตารางการทำงานของควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในกรณีศึกษาที่ 2 ถึงกรณีศึกษาที่ 5 ได้แสดงไว้ตารางที่ 9-6 ถึงตารางที่ 9-8 ตารางการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในกรณีศึกษาที่ 5 มีรายละเอียดตามตารางที่ 9-9 ในขณะที่การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของกรณีศึกษาทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 9-10

ตารางที่ 9-6 ตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีศึกษาที่ 2 และ 3

อุปกรณ์	ระดับโหลดที่								จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	7	8	8	8	8	8	8	7	2
2) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย									
ชุดที่ 1	1	1	2	2	1	2	2	1	4
3) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน									
บัสหมายเลข 8	2	3	4	5	5	5	5	2	6
บัสหมายเลข 15	3	4	5	5	5	4	4	2	6
บัสหมายเลข 24	3	3	4	5	4	5	4	3	6

ตารางที่ 9-7 ตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีศึกษาที่ 4

อุปกรณ์	ระดับโหลดที่								จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	0	1	1	2	1	2	2	0	6
2) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย									
ชุดที่ 1	4	4	3	2	3	2	3	4	6
3) จำนวนขั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน									
บัสหมายเลข 8	1	3	4	4	4	4	4	3	6
บัสหมายเลข 15	1	2	3	4	4	4	4	1	6
บัสหมายเลข 24	1	1	3	4	4	4	4	1	6

ตารางที่ 9-8 ตารางการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในกรณีศึกษาที่ 5

อุปกรณ์	ระดับโหลดที่								จำนวนครั้ง การทำงาน
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1) ตำแหน่งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง	3	4	5	6	5	6	5	3	8
2) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย									
ชุดที่ 1	2	2	1	1	2	2	1	1	4
3) จำนวนชั้นของตัวเก็บประจุในสายป้อน									
บัสหมายเลข 8	2	3	4	5	5	5	5	2	6
บัสหมายเลข 15	3	3	3	5	3	4	4	4	6
บัสหมายเลข 24	1	2	4	4	4	4	4	2	6

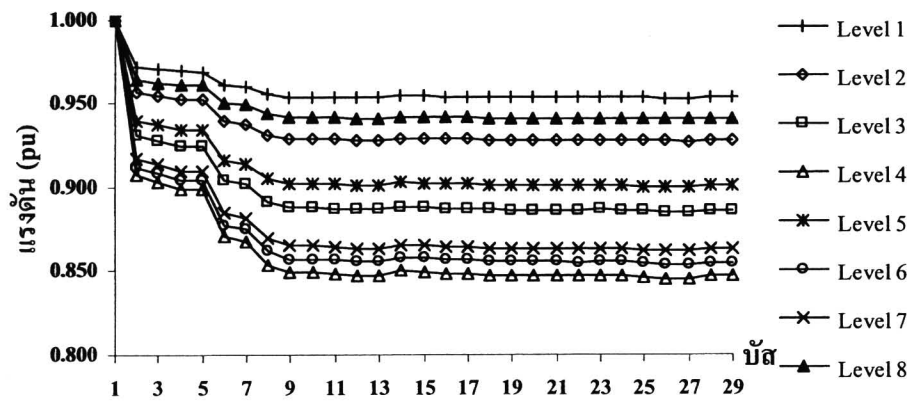
ตารางที่ 9-9 ตารางการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในกรณีศึกษาที่ 5

ระดับ โหลดที่	บัสหมายเลข 7		บัสหมายเลข 13		บัสหมายเลข 27	
	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)
1	127.22	3.11	150	91.69	83.33	16.78
2	176.92	82.71	168.97	62.97	110.25	67.65
3	208.02	6.74	158.17	26.57	78.19	26.29
4	186.21	4.35	179.21	101.46	172.31	91
5	201.62	8.34	150.48	49.54	140.55	67.91
6	185.24	5.67	169.33	41.42	123.49	53.76
7	156.80	97.17	155.64	25.83	75	15
8	179.60	99.81	203.21	96.12	108.08	49.75

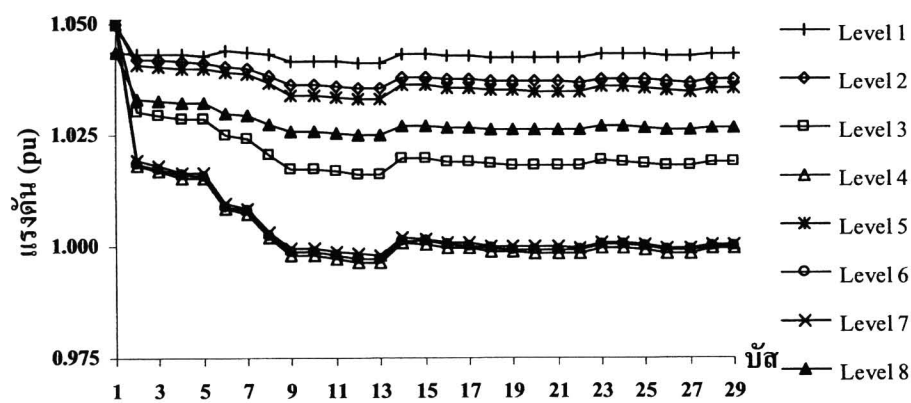
ตารางที่ 9-10 ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของกรณีศึกษาทั้งหมด

	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (บาท/วัน)	ราคารับซื้อไฟฟ้า (บาท/วัน)	รวม (บาท/วัน)
กรณีศึกษาที่ 1	16,417.96	-	16,417.96
กรณีศึกษาที่ 2	9,248.30	-	9,248.30
กรณีศึกษาที่ 3	6,573.67	56,021.65	62,595.32
กรณีศึกษาที่ 4	6,891.08	56,021.65	62,912.73
กรณีศึกษาที่ 5	7,661.44	32,759.49	40,420.93

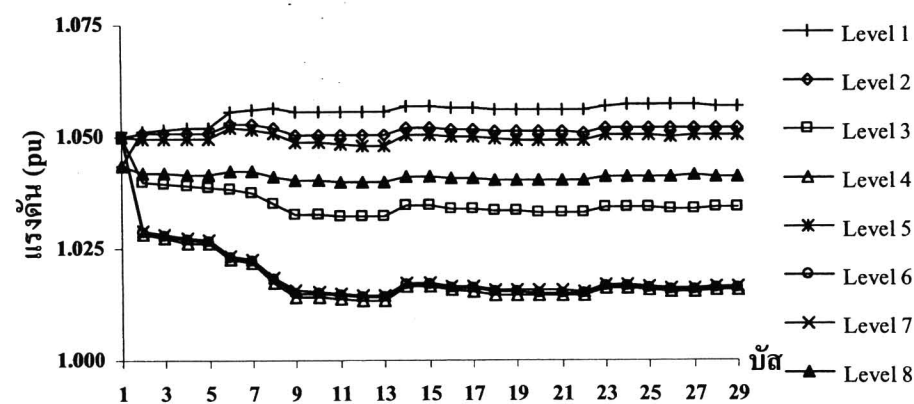
ขนาดแรงดันบัส ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในทุกกรณีศึกษา
ได้แสดงไว้ในภาพที่ 9-2 ถึงภาพที่ 9-8



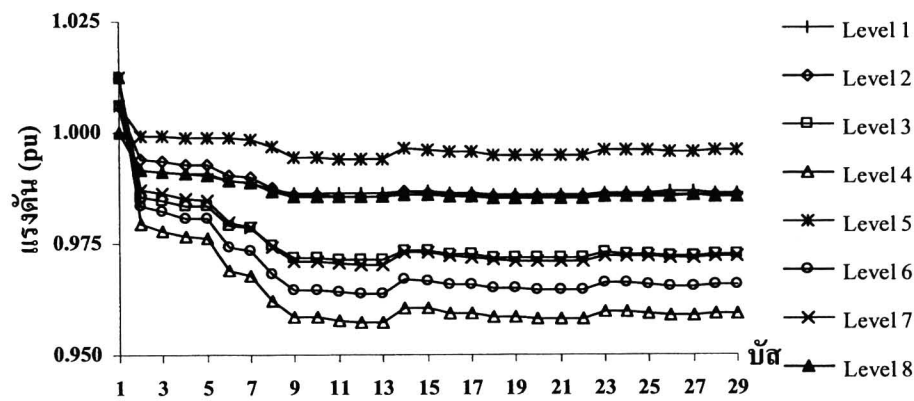
ภาพที่ 9-2 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 1



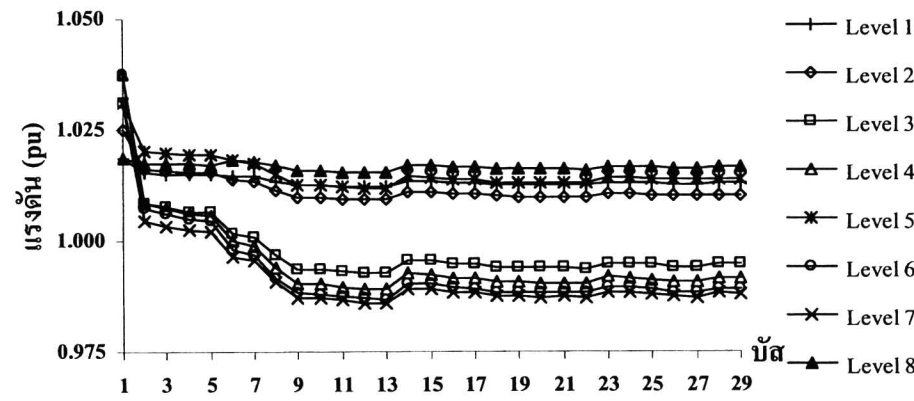
ภาพที่ 9-3 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 2



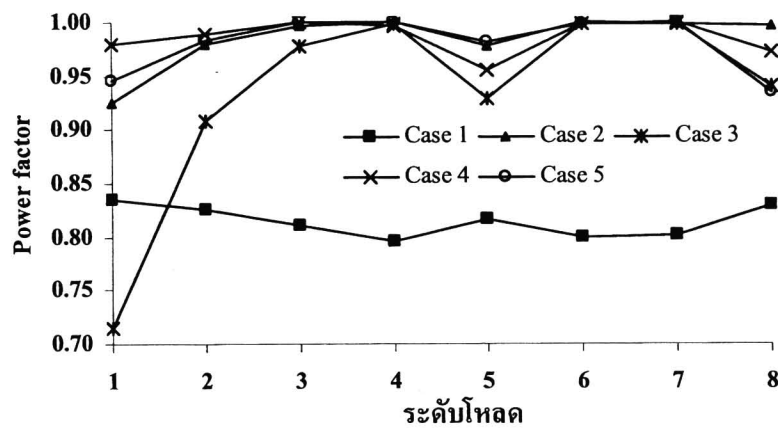
ภาพที่ 9-4 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 3



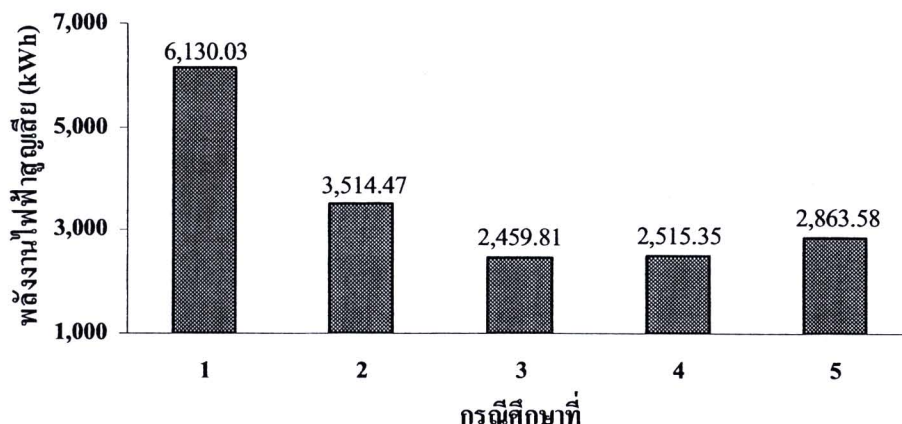
ภาพที่ 9-5 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 4



ภาพที่ 9-6 ขนาดแรงดันบัสในกรณีศึกษาที่ 5



ภาพที่ 9-7 ค่าตัวประกอบกำลังของกรณีศึกษาทั้งหมด



ภาพที่ 9-8 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งหมด

ในกรณีศึกษาที่ 1 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมจากทุกระดับโหลดมีค่าเท่ากับ 6,130 kWh/วัน และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเท่ากับ 16,418 บาท/วัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 9-2 และภาพที่ 9-7 พบว่า ระดับโหลดที่ 2 จนถึงระดับโหลดที่ 8 มีบัสที่ขนาดแรงดันต่ำกว่า 0.95 pu ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์แรงดันต่ำสุดของเงื่อนไขบังคับ ส่วนตัวประกอบกำลังของระบบในทุกระดับโหลดมีค่าประมาณ 0.80-0.83 ซึ่งไม่เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนดเช่นกัน ระบบจำหน่ายที่พิจารณาจึงต้องการการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบ

จากภาพที่ 9-2 และภาพที่ 9-7 จะเห็นได้ว่า การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟของกรณีศึกษาที่ 2 ช่วยปรับปรุงขนาดแรงดันบัสและค่าตัวประกอบกำลังของระบบในทุกระดับโหลดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียภายหลังการควบคุมมีค่าเท่ากับ 3,514 kWh/วัน และ 9,249 บาท/วัน ซึ่งมีค่าลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณร้อยละ 43 จากตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดในกรณีศึกษาที่ 2 จะพบว่า ในทุกระดับโหลด ตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงได้ถูกปรับตั้งที่ตำแหน่งสูง (ตำแหน่ง 7 และ 8) และเปลี่ยนสถานะการทำงานเพียง 2 ครั้ง ส่วนตัวเก็บประจุในสายป้อนต้องชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบในปริมาณมากที่ระดับโหลดสูง (ระดับโหลดที่ 4-7) เนื่องจากขณะที่ไม่มีการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ ขนาดแรงดันบัสในทุกระดับโหลดมีค่าค่อนข้างต่ำ

ในกรณีศึกษาที่ 3 การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟยังคงใช้ตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อนจากกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเมื่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบด้วยค่ากำลังขาออกสูงสุด (Maximum Outputs) ในทุกระดับโหลด โดย กฟภ. ต้องจ่ายเงินค่ารับซื้อ

ไฟฟ้าทั้งหมด 56,022 บาท/วัน พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบในกรณีศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 2,460 kWh/วัน และ 6,574 บาท/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณร้อยละ 60 อย่างไรก็ตาม ภาพที่ 9-5 แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันที่บางบัสในระดับโวลต์ที่ 1 ระดับโวลต์ที่ 2 และระดับโวลต์ที่ 5 มีค่าสูงกว่า 1.05 pu ซึ่งไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนด ผลที่ได้จากกรณีศึกษานี้แสดงถึงผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวต่อการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ รวมถึงความจำเป็นของการประสานการทำงานระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

ในกรณีศึกษาที่ 4 ตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดของตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อนได้ถูกกำหนดขึ้นใหม่ เพื่อประสานการทำงานกับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวซึ่งจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบด้วยค่ากำลังขาออกสูงสุดในทุกระดับโวลต์ ตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดซึ่งกำหนดขึ้นใหม่ทำให้ขนาดแรงดันบัสและค่าตัวประกอบกำลังของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ โดยพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเท่ากับ 2,515 kWh/วัน และ 6,891 บาท/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณร้อยละ 58 และ กฟภ. ยังคงจ่ายเงินค่ารับซื้อไฟฟ้า 56,022 บาท/วัน เมื่อพิจารณาตารางการทำงานเหมาะสมที่สุดของกรณีศึกษานี้ พบว่าตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงได้ถูกปรับตั้งไว้ที่ตำแหน่งกลาง (ระหว่างตำแหน่ง 0 ถึง 2) โดยตำแหน่งปรับตั้งจะถูกปรับให้สัมพันธ์กับความต้องการโหลดในแต่ละระดับโวลต์ ส่วนตัวเก็บประจุในสายป้อนจะชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบด้วยปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2

สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 เป็นกรณีศึกษาที่ กฟภ. สามารถแจ้งให้เจ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวปรับเปลี่ยนการจ่ายกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟในแต่ละระดับโวลต์ การประสานการทำงานระหว่างตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุในสายป้อน และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในกรณีศึกษานี้ ทำให้ขนาดแรงดันบัสรวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียและมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเท่ากับ 2,864 kWh/วัน และ 7,661 บาท/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณร้อยละ 53 และมีค่าสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 4 เล็กน้อย แต่ในกรณีศึกษาที่ 5 นี้ กฟภ. จ่ายเงินค่ารับซื้อไฟฟ้าเพียง 32,759 บาท/วัน ซึ่งลดลงจากกรณีศึกษาที่ 4 เท่ากับ 23,262 บาทต่อวัน (ร้อยละ 41.5) และเมื่อพิจารณาตารางการทำงานเหมาะสมที่สุด พบว่า ตำแหน่งปรับตั้งตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงและตัวเก็บประจุในสายป้อนของกรณีศึกษาที่ 5 มีค่าอยู่ตรงกลางระหว่างตำแหน่งปรับตั้งของอุปกรณ์ทั้งสองในกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 4

ผลการศึกษาที่ได้แสดงถึงความจำเป็นของการประสานการทำงานระหว่างตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย ตัวเก็บประจุในสายป้อน และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพื่อการควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่าย ซึ่งนอกจากทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลงแล้ว ยังช่วยป้องกันปัญหาแรงดันเกินเมื่อตัวเปลี่ยนจุดแยกหม้อแปลงหรือตัวเก็บประจุมีการเปลี่ยนสถานะการทำงาน นอกจากนี้ การประสานการทำงานยังทำให้ผู้ดำเนินงานระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้รับประโยชน์ที่มากขึ้นอีกด้วย