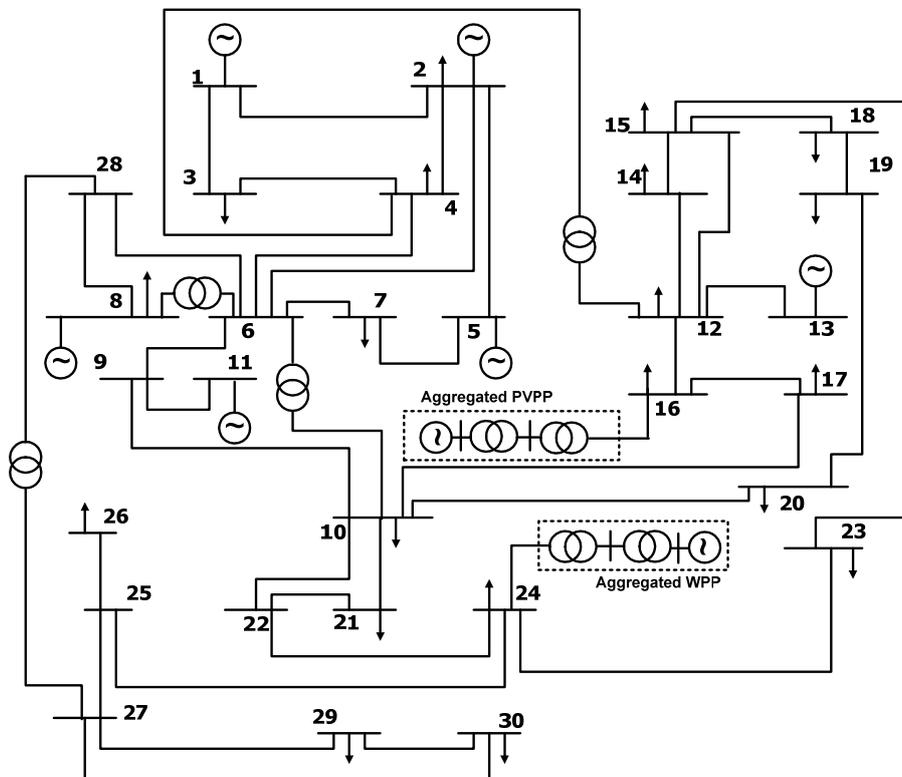


บทที่ 4

ผลการทดสอบวิธีการ

4.1 การทดสอบแบบจำลองการหาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้า

ในการทดสอบแบบจำลองการไหลของกำลังงานไฟฟ้าได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE โดยได้จำลองให้มีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่บัส 16 และ 24 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE ที่เพิ่มเติม โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโรงไฟฟ้าพลังงานลมสำหรับทดสอบ

ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส สามารถอ้างอิงได้จาก [O. Alsac and B. Stott, 1974] และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยในการทดสอบได้กำหนดค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงและค่าตัวประกอบการมีส่วนร่วมของโรงไฟฟ้าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในการทดสอบกับระบบ
ไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส

Plant	At Bus	Power	V	Equivalent Transformer at		Equivalent Cable of Plant Collector		Equivalent Plant	
		Gen (MW)		R	X (p.u.)	R	X (p.u.)	R	X (p.u.)
PVPP	16	10	1.05	0	0.1	0.01	0.1	0	0.1
WPP	24	10	1.05	0	0.1	0.01	0.1	0	0.1

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงและค่าตัวประกอบการมีส่วนร่วมของโรงไฟฟ้าในการทดสอบ
กับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส

At Bus	Power Generation (MW)	Participation Factor
1	50	0.2
2	40	0.2
5	40	0.3
8	50	0.1
11	30	0.1
13	40	0.2

ในการทดสอบได้กำหนดค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส i ใดๆ เป็น

$$P_{Li} = P_{Loi} (0.8 + 0.1V_i + 0.1V_i^2) \quad \text{และ} \quad Q_{Li} = Q_{Loi} (0.8 + 0.1V_i + 0.1V_i^2)$$

ทั้งนี้กำหนดให้บัส 1 เป็นบัสอ้างอิงมุมเฟส ซึ่งผลลัพธ์ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยตารางที่ 4.3 เป็นผลลัพธ์ในกรณีที่หาค่าตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีดั้งเดิมส่วนตารางที่ 4.4 เป็นผลลัพธ์จากวิธีที่นำเสนอ

จะเห็นว่าผลลัพธ์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าจากวิธีการดั้งเดิมมีค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงรวมจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น 286.9 MW ในขณะที่กำลังงานรวมของโหลดในระบบเป็น 283.4 MW มีค่าความสูญเสียในระบบเท่ากับ 4.5 MW โดยในวิธีนี้กำลังงานไฟฟ้าจริงและกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดจะเป็นค่าคงที่และกำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าตามที่กำหนดคงที่ไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีดั้งเดิม

BUS	V (p.u.)	DEL (Deg.)	P-Gen (MW)	Q-Gen (MVar)	P-Load (MW)	Q-Load (MVar)
1	1.06	0	66.4	19.8	0	0
2	1.045	-1.3	40	24.2	21.7	13.3
3	1.03	-1.6	0	0	2.4	1.3
4	1.023	-1.9	0	0	7.6	1.7
5	1.01	-5.3	40	17.8	94.2	19.2
6	1.018	-2.3	0	0	0	0
7	1.007	-4	0	0	22.8	11
8	1.01	-1.8	50	1.7	30	30.3
9	1.055	-2	0	0	0	0
10	1.05	-3.5	0	0	5.8	2.2
11	1.082	1.2	30	14.8	0	0
12	1.063	-2.1	0	0	11.2	8.5
13	1.071	0.7	40.5	7.2	0	0
14	1.049	-3.1	0	0	6.1	1.8
15	1.044	-3.2	0	0	8.3	2.6
16	1.053	-2.3	0	0	3.5	2
17	1.045	-3.4	0	0	9	6.3
18	1.034	-4	0	0	3.2	1
19	1.031	-4.3	0	0	9.5	3.6
20	1.035	-4.2	0	0	2.2	0.8
21	1.039	-3.9	0	0	17.5	12.1
22	1.04	-3.9	0	0	0	0
23	1.038	-3.7	0	0	3.2	1.7
24	1.037	-4	0	0	8.7	7.2
25	1.025	-4.8	0	0	0	0
26	1.008	-5.2	0	0	3.5	2.3
27	1.027	-5	0	0	0	0
28	1.013	-2.4	0	0	0	0
29	1.007	-6.2	0	0	2.4	0.9
30	0.996	-7.1	0	0	10.6	1.9
PVPP	1.05	-0.8	10	-1.2	0	0
WPP	1.05	-2.4	10	4.2	0	0
Total			286.9	88.5	283.4	131.7

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีที่นำเสนอ

BUS	V (p.u.)	DEL (Deg.)	P-Gen (MW)	Q-Gen (MVar)	P-Load (MW)	Q-Load (MVar)
1	1.06	0	53.3	23.4	0	0
2	1.045	-0.9	43.3	22.1	22	13.3
3	1.03	-1.3	0	0	2.4	1.3
4	1.024	-1.5	0	0	7.7	1.7
5	1.01	-4.6	44.9	16.1	94.5	19.2
6	1.018	-1.8	0	0	0	0
7	1.007	-3.4	0	0	22.8	11
8	1.01	-1.2	51.6	0.7	30.1	30.3
9	1.055	-1.3	0	0	0	0
10	1.05	-2.9	0	0	5.9	2.2
11	1.082	2	31.6	14.9	0	0
12	1.063	-1.4	0	0	11.4	8.3
13	1.071	1.7	43.8	7.1	0	0
14	1.049	-2.4	0	0	6.2	1.8
15	1.045	-2.6	0	0	8.4	2.6
16	1.053	-1.7	0	0	3.6	2
17	1.045	-2.7	0	0	9.1	6.3
18	1.034	-3.4	0	0	3.2	1
19	1.031	-3.7	0	0	9.6	3.6
20	1.035	-3.5	0	0	2.2	0.7
21	1.039	-3.3	0	0	17.7	12
22	1.04	-3.3	0	0	0	0
23	1.038	-3.1	0	0	3.2	1.7
24	1.038	-3.4	0	0	8.8	7.1
25	1.026	-4.2	0	0	0	0
26	1.008	-4.6	0	0	3.5	2.3
27	1.027	-4.4	0	0	0	0
28	1.013	-1.9	0	0	0	0
29	1.007	-5.7	0	0	2.4	0.9
30	0.996	-6.5	0	0	10.6	1.9
PVPP	1.05	-0.1	10	-1.3	0	0
WPP	1.05	-1.8	10	4.2	0	0
Total			288.5	87.2	285.3	131.2

ผลลัพธ์ของวิธีการที่นำเสนอมีค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมเท่ากับ 288.5 MW และค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของโหลดรวมเท่ากับ 285.3 MW มีค่ากำลังงานสูญเสีย 3.2 MW ซึ่งจากผลลัพธ์ในตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าวิธีการที่เสนอมีการจำลองผลการตอบสนองของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบตามค่าตัวประกอบการมีส่วนร่วมได้และยังสามารถวิเคราะห์ผลจากพฤติกรรมของโหลดในระบบที่แปรตามแรงดันได้ ทำให้การหาผลลัพธ์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังมีแบบจำลองที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากขึ้นและยืดหยุ่นต่อความต้องการกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

4.2 การทดสอบแบบจำลองการไหลของการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

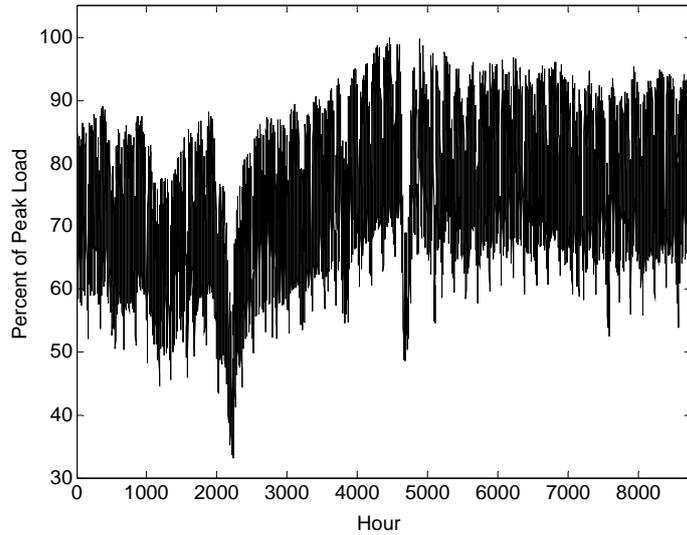
ในการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้มีขั้นตอนในการศึกษาหาแบบจำลองทางสถิติที่เหมาะสมของภาระไฟฟ้าจากข้อมูลการใช้ไฟฟ้าจริงในระบบไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลสถิติการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยในปี 2553 [Electricity Generating Authority of Thailand, Statistical Report, 2010] มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลองการกระจายแบบปกติและการกระจายแบบไวบูลล์ จากนั้นใช้วิธี Akaike Information Criteria (AIC) [H. Akaike, 1974] ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง ระบบไฟฟ้ากำลังที่นำมาทดสอบคือ ระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE และ ระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE [Power Systems Test Case Archive, University of Washington], [Power Systems Test Case Archive, University of Washington ; R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, 2001]

4.2.1 การศึกษาแบบจำลองทางสถิติของภาระไฟฟ้า

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยรายชั่วโมงตลอดปี 2553 ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางสถิติของภาระไฟฟ้า ลักษณะการใช้ไฟฟ้าตลอดปีได้แสดงในภาพประกอบ 4.2 และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองตามวิธีในหัวข้อ 3.3.2 โดยใช้การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) และแบบไวบูลล์ ค่าภาระที่เวลา 14:00 น. ของทุกวันจะสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.3 และได้พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปกติและแบบไวบูลล์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

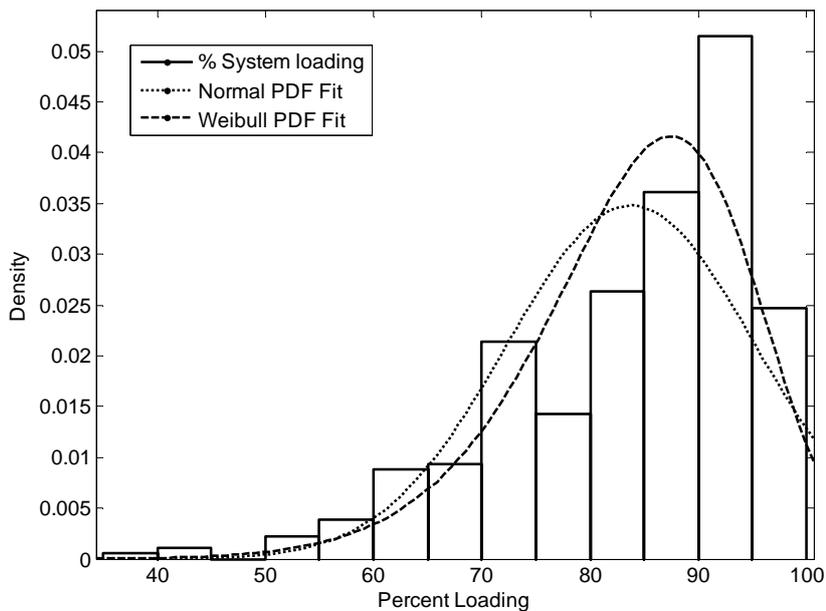
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์และค่า AIC ของการจำลองภาระไฟฟ้าด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์และแบบปกติ

PDF Model	Weibull PDF	Normal PDF
Parameters Estimation	Shape = 88.4039 Scale = 9.95245 AIC = 2748.90	Mean = 83.7874 Sigma = 11.4642 AIC = 2819.46



ภาพประกอบ 4.2 ลักษณะของภาระไฟฟ้ารายชั่วโมงตลอดปีที่นำมาศึกษา

ภาพประกอบ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบของการจำลองด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์และแบบปกติบนฮิสโตแกรมของภาระในช่วงเวลาที่พิจารณา จะเห็นได้ชัดเจนว่าการจำลองด้วยฟังก์ชันแบบไวบูลล์จะมีแบบจำลองที่ใกล้เคียงความเป็นจริงกว่าการจำลองด้วยการกระจายแบบปกติ นอกจากนี้ค่า AIC ในตารางที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยฟังก์ชันแบบไวบูลล์มีความใกล้เคียงการกระจายความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าจริงมากกว่าฟังก์ชันการกระจายแบบปกติจากค่า AIC ที่ต่ำกว่า



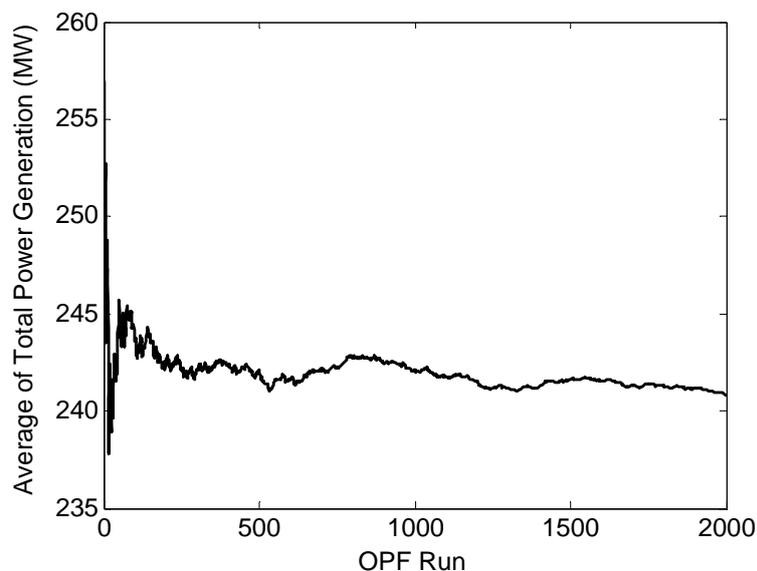
ภาพประกอบ 4.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าที่เวลา 14:00 น. ของทุกวันของประเทศไทยในปี 2553

4.2.2 การทดสอบวิธีการประเมินพารามิเตอร์ของไวบูลล์กับระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE

ระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE ที่นำมาทดสอบเป็นระบบจาก [Power Systems Test Case Archive, University of Washington] ในการทดสอบระบบนี้ได้ใช้แบบจำลองต้นทุนการผลิตเป็นสมการโพลีโนเมียลยกกำลังสอง ดังตารางที่ 4.6 และใช้ลักษณะการกระจายความน่าจะเป็นของภาระในหัวข้อ 4.2.1 ในการทดสอบกระบวนการคำนวณ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ใช้ในการประเมินพารามิเตอร์ของไวบูลล์คือเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10^{th} , 25^{th} และ 40^{th} ดังนั้น $NP = \{10, 25, 40\}$ ผลลัพธ์จากการคำนวณที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10^{th} , 25^{th} และ 40^{th} แสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 30 บัส ของ IEEE

Bus	$FC_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i$			MW Min	MW Max
	a_i	b_i	c_i		
1	0.01375	1.70	0.0	20	200
2	0.01750	1.75	0.0	20	100
5	0.02250	1.50	0.0	15	80
8	0.01834	1.85	0.0	10	60
11	0.01500	2.00	0.0	10	50
13	0.02500	1.80	0.0	12	60



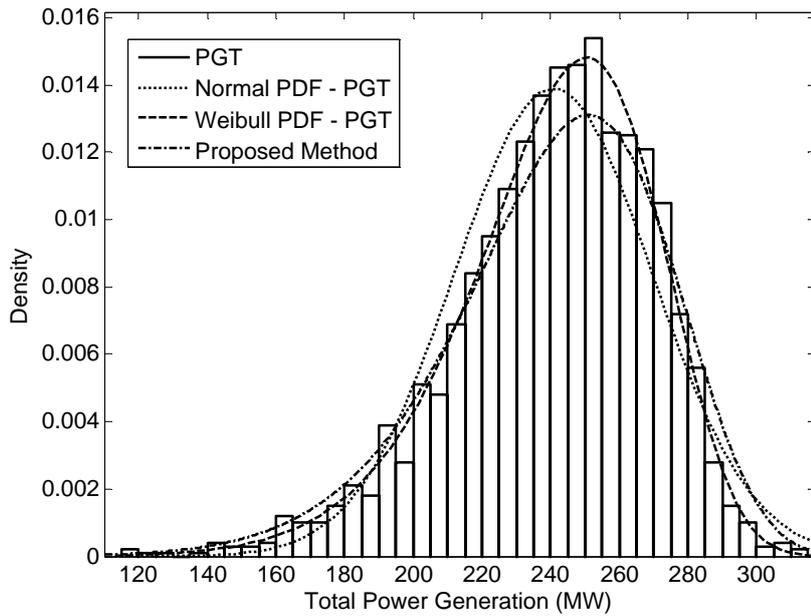
ภาพประกอบ 4.6 การลู่เข้าของการคำนวณด้วย MCS กับระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ไวบูลล์จากการประเมินที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ 10th/90th, 25th/75th และ 40th/60th
ของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ของ IEEE

OPF Variables	10 th /90 th percentiles pair			25 th /75 th percentiles pair			40 th /60 th percentiles pair		
	Shape	Scale	AIC	Shape	Scale	AIC	Shape	Scale	AIC
<i>PGT</i>	249.6409	9.3675	18,995.33	255.4508	8.0687	19,152.64	258.1354	9.5704	19,053.76
<i>P_{G1}</i>	54.7734	10.0412	12,812.26	55.9607	8.6172	12,894.39	56.4947	10.3219	12,814.79
<i>P_{G2}</i>	42.7364	9.5527	11,985.39	43.7143	8.2111	12,080.17	44.158	9.8241	12,001.08
<i>P_{G5}</i>	41.2454	10.8249	11,383.77	42.0283	9.2534	11,478.34	42.4022	10.8401	11,408.99
<i>P_{G8}</i>	38.9682	8.9189	11,946.04	39.9292	7.7176	12,088.51	40.3817	9.0649	12,061.76
<i>P_{G11}</i>	42.7309	7.9006	12,754.78	43.9599	6.8699	12,812.26	44.5377	8.1177	12,744.42
<i>P_{G13}</i>	29.1591	9.2539	10,597.67	29.8511	7.9759	10,691.08	30.162	9.5404	10,622.59

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์จากการคำนวณด้วยวิธี MCS ของฟังก์ชันแบบไวบูลล์และแบบปกติ
เปรียบเทียบกับค่าประเมินพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์จากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ตามวิธีที่นำเสนอ
ของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ของ IEEE

OPF Variables	MCS						Proposed Method (Weibull parameter estimation)		
	Weibull PDF fit			Normal PDF fit			Shape	Scale	AIC
	Shape	Scale	AIC	Mean	Sigma	AIC			
<i>PGT</i>	252.995	10.135	18,958.00	240.830	28.719	19,109.00	254.409	9.002	19,017.53
<i>P_{G1}</i>	55.628	10.323	12,766.28	53.052	6.017	12,856.80	55.743	9.660	12,785.61
<i>P_{G2}</i>	43.400	9.875	11,944.66	41.311	4.893	12,029.82	43.536	9.196	11,968.04
<i>P_{G5}</i>	41.756	11.052	11,350.04	39.936	4.024	11,422.88	41.892	10.306	11,373.85
<i>P_{G8}</i>	39.257	9.143	11,937.70	37.178	5.025	12,136.08	39.760	8.567	11,985.08
<i>P_{G11}</i>	43.692	8.192	12,695.80	41.229	5.909	12,784.42	43.743	7.629	12,715.18
<i>P_{G13}</i>	29.596	9.514	10,561.88	28.124	3.465	10,649.56	29.724	8.923	10,583.58
Number of OPF Runs	≥ 1504			≥ 1504			6		



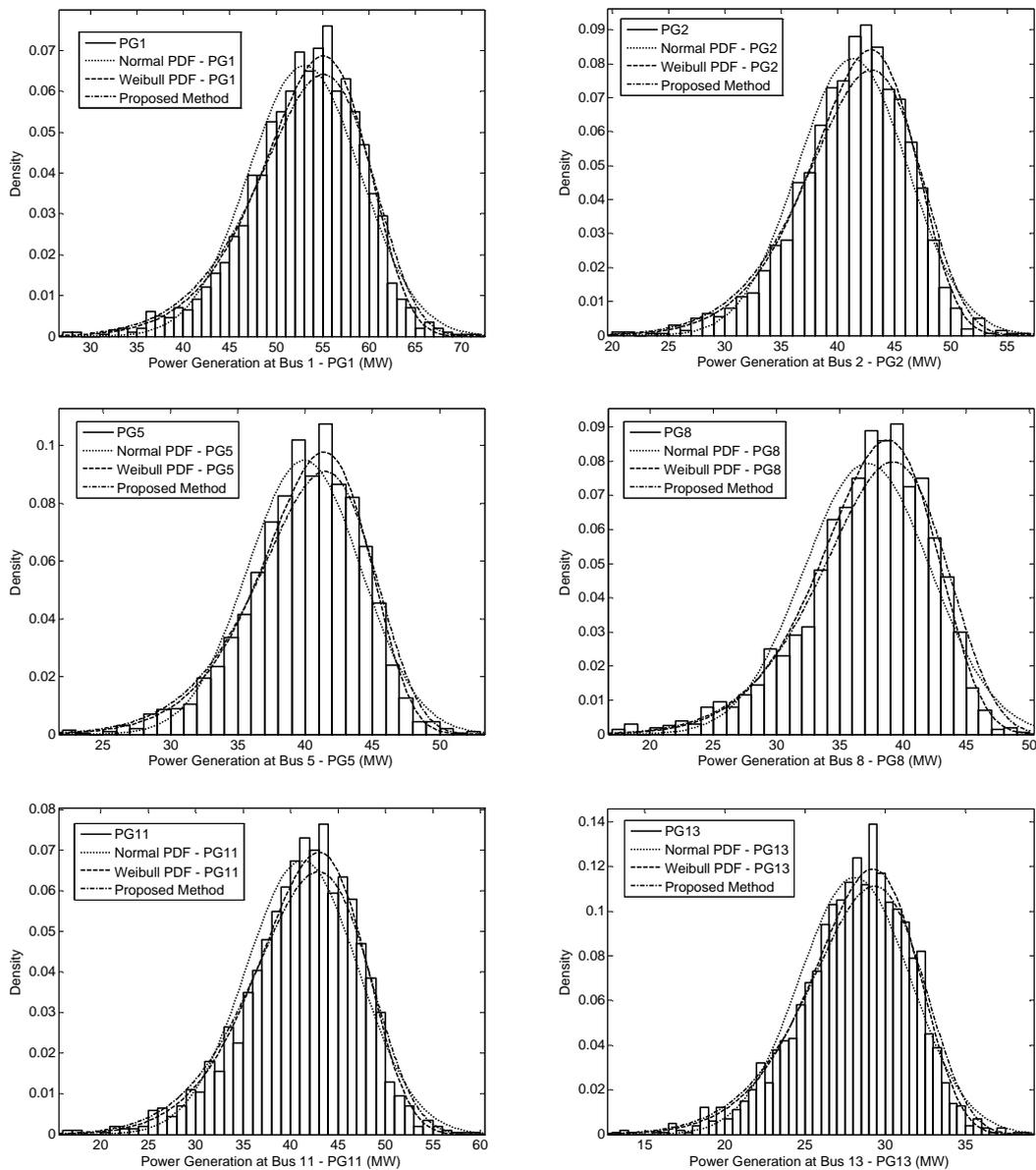
ภาพประกอบ 4.7 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าผลิตรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัสของ IEEE

จากภาพประกอบ 4.6 การคำนวณด้วย MCS ต้องใช้จำนวนรอบเท่ากับ 1504 รอบในการดูเข้า ซึ่งต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณคือหน่วยความจำคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณที่มาก ในตารางที่ 4.7 เป็นการแสดงพารามิเตอร์ไวบูลล์จากการประเมินที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ $10^{th}/90^{th}$, $25^{th}/75^{th}$ และ $40^{th}/60^{th}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ของ IEEE พร้อมแสดงค่า AIC จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแต่ละค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันเล็กน้อย ซึ่งในกรณีนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินจากเปอร์เซ็นต์ไทล์ $10^{th}/90^{th}$ ให้ผลลัพธ์แบบจำลองที่สะท้อนความเป็นจริงมากที่สุดจากค่า AIC ที่ต่ำที่สุด

ภาพประกอบ 4.7 แสดงฮิสโตแกรมที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี MCS จำนวน 2000 รอบ และได้แสดงแบบจำลองที่ได้จากการประมาณเป็นการกระจายแบบปกติ (Normal) และฟังก์ชันแบบไวบูลล์ (Weibull) จากข้อมูลที่ได้ รวมทั้งผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอคือการประเมินค่าพารามิเตอร์ไวบูลล์จากเปอร์เซ็นต์ไทล์

ผลลัพธ์ความน่าจะเป็นของค่ากำลังงานจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตที่แสดงด้วยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณด้วยวิธี MCS ของฟังก์ชันแบบไวบูลล์และแบบปกติ เปรียบเทียบกับการประเมินพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์จากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ตามวิธีที่นำเสนอของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ของ IEEE ได้แสดงในตารางที่ 4.8 จากผลลัพธ์นี้จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไวบูลล์ที่ประมาณจาก MCS เป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดเนื่องจากมีค่า AIC ที่ต่ำที่สุดคือ 18,958.00 ในขณะที่ผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบไวบูลล์ ที่ได้จาก

การประเมินด้วยเปอร์เซ็นต์ไทล์ให้ค่า AIC เท่ากับ 19,017.53 ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าการจำลองด้วยการกระจายแบบปกติที่ประมาณจาก MCS ที่มีค่า AIC เท่ากับ 19,190.00



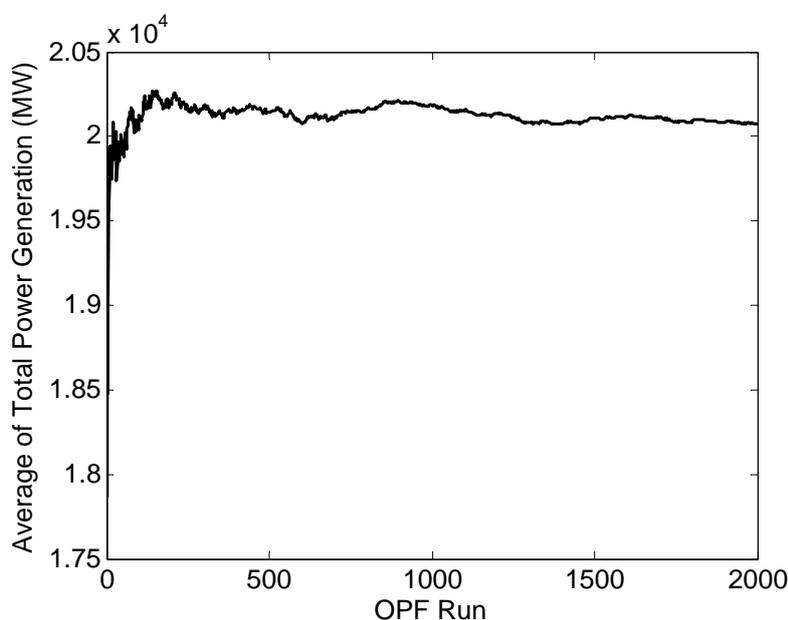
ภาพประกอบ 4.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่ากำลังงานจริงที่ผลิตที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส ของ IEEE

ในทำนองเดียวกันค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์ที่ได้จากการประมาณด้วยเปอร์เซ็นต์ไทล์ของค่ากำลังงานจริงที่ผลิตที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ก็ให้ค่า AIC ที่ต่ำกว่าการประมาณเป็นการกระจายแบบปกติ นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์คือ shape และ scale ยังมีค่าใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ของไวบูลล์ที่ประมาณจาก MCS ด้วย

ภาพประกอบ 4.8 แสดงฮิสโตแกรมพร้อมด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นจริงจากวิธีสุ่มแบบ MCS กว่าประมาณค่าเป็นการกระจายแบบปกติ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังใช้การคำนวณเพียง 6 รอบ คือการคำนวณที่ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่กำหนดไว้กับคู่ของเปอร์เซ็นต์ไทล์ดังกล่าวคือที่ค่าภาระไฟฟ้าเป็นเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10th, 25th, 40th, 60th, 75th และ 90th ซึ่งทำให้การคำนวณลดระยะเวลาและทรัพยากรลงมาก

4.2.3 การทดสอบวิธีการประเมินพารามิเตอร์ของไวลบูลล์กับระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE

ในงานวิจัยนี้ยังทดสอบวิธีการกับระบบขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนเพื่อดูแนวทางในการประยุกต์ใช้จริงด้วยคือระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE [Power Systems Test Case Archive, University of Washington] โดยต้นทุนการผลิตได้ใช้ข้อมูลจาก [R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, 200] ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าใช้รูปแบบเดียวกับในหัวข้อ 4.2.2 และใช้การคำนวณที่ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์เดียวกันกับหัวข้อ 4.2.2 เช่นเดียวกันในการทดสอบวิธีการที่นำเสนอ



ภาพประกอบ 4.9 การลู่เข้าของการคำนวณด้วย MCS กับระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE

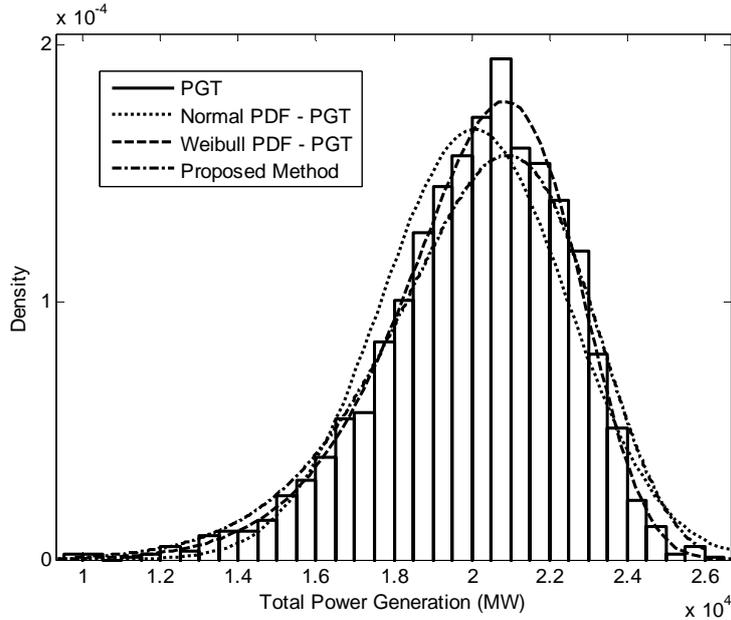
ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ไวบูลล์จากการประเมินที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ 10th/90th, 25th/75th และ 40th/60th

ของระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัส ของ IEEE

OPF Variables	10 th /90 th percentiles pair			25 th /75 th percentiles pair			40 th /60 th percentiles pair		
	Shape	Scale	AIC	Shape	Scale	AIC	Shape	Scale	AIC
<i>P_{GT}</i>	20,814.371	9.394	36,671.96	21,299.984	8.086	36,835.24	21,524.345	9.575	36,738.74
<i>P_{G84}</i>	381.834	9.654	20,510.73	391.678	8.285	20,712.47	396.133	9.922	20,600.59
<i>P_{G91}</i>	139.450	11.827	15,672.95	142.570	10.164	15,887.60	143.968	12.244	15,771.87
<i>P_{G92}</i>	250.536	11.307	18,192.31	256.391	9.732	18,403.61	259.022	11.727	18,289.07
<i>P_{G98}</i>	67.089	11.680	12,799.60	68.591	10.014	13,015.27	69.262	12.038	12,899.23
<i>P_{G108}</i>	125.014	10.249	15,812.49	128.061	8.775	16,019.09	129.430	10.508	15,905.16
<i>P_{G119}</i>	1,702.426	8.560	26,953.25	1,752.417	7.375	27,148.71	1,775.081	8.844	27,039.40
<i>P_{G124}</i>	215.101	8.607	18,657.44	221.391	7.409	18,854.48	224.230	8.886	18,744.20
<i>P_{G141}</i>	235.651	10.206	18,351.27	241.664	8.788	18,557.39	244.370	10.574	18,444.45
<i>P_{G143}</i>	568.432	10.993	21,577.60	582.159	9.477	21,786.95	588.339	11.427	21,673.27
<i>P_{G146}</i>	68.210	11.069	13,066.56	69.869	9.535	13,279.62	70.611	11.500	13,165.42
<i>P_{G147}</i>	169.414	11.372	16,598.06	173.444	9.809	16,810.52	175.253	11.847	16,696.31
<i>P_{G149}</i>	83.439	11.485	13,726.35	85.408	9.896	13,940.77	86.289	11.947	13,826.17
<i>P_{G152}</i>	285.420	10.197	19,115.22	292.856	8.804	19,320.98	296.203	10.617	19,208.66
<i>P_{G153}</i>	165.681	10.265	16,912.93	169.983	8.861	17,119.60	171.918	10.688	17,007.16
<i>P_{G170}</i>	169.726	9.807	17,193.12	174.258	8.451	17,398.07	176.290	10.179	17,284.92
<i>P_{G176}</i>	164.619	14.015	15,640.55	168.054	12.138	15,863.93	169.588	14.797	15,747.94
<i>P_{G177}</i>	66.786	12.643	12,450.33	68.266	10.904	12,671.00	68.925	13.210	12,554.88
<i>P_{G185}</i>	173.889	9.605	17,375.90	178.533	8.267	17,578.70	180.628	9.929	17,467.02
<i>P_{G186}</i>	998.966	9.607	24,366.26	1,025.814	8.281	24,568.16	1,037.939	9.958	24,456.69
<i>P_{G187}</i>	1,002.185	9.588	24,386.84	1,029.147	8.264	24,588.62	1,041.324	9.937	24,477.18
<i>P_{G190}</i>	480.751	9.562	21,468.53	493.300	8.213	21,669.36	498.985	9.838	21,558.02
<i>P_{G191}</i>	1,676.485	8.680	26,830.64	1,726.178	7.500	27,026.51	1,748.729	9.018	26,917.54
<i>P_{G198}</i>	416.969	9.808	20,798.77	427.649	8.423	21,001.46	432.475	10.098	20,889.21
<i>P_{G213}</i>	263.460	10.506	18,689.87	269.866	9.027	18,896.21	272.759	10.838	18,783.10
<i>P_{G220}</i>	102.765	9.542	15,304.97	105.467	8.185	15,508.33	106.682	9.809	15,395.45
<i>P_{G221}</i>	462.597	9.452	21,360.65	474.772	8.115	21,561.23	480.282	9.718	21,449.66
<i>P_{G222}</i>	257.049	9.600	18,949.32	263.731	8.239	19,151.31	266.748	9.870	19,039.08
<i>P_{G227}</i>	312.958	9.562	19,752.44	321.111	8.205	19,954.22	324.792	9.829	19,841.88
<i>P_{G230}</i>	344.527	9.688	20,083.68	353.446	8.322	20,285.55	357.483	9.973	20,173.80
<i>P_{G233}</i>	310.741	9.559	19,725.32	318.836	8.203	19,926.91	322.493	9.825	19,814.79
<i>P_{G236}</i>	605.058	9.634	22,359.01	620.745	8.274	22,560.30	627.852	9.913	22,448.68
<i>P_{G238}</i>	253.314	9.622	18,880.92	259.906	8.260	19,083.07	262.881	9.900	18,970.79
<i>P_{G239}</i>	551.278	9.659	21,975.99	565.558	8.297	22,177.48	572.025	9.942	22,065.80
<i>P_{G241}</i>	583.564	9.622	22,219.28	598.695	8.263	22,420.50	605.551	9.899	22,308.91
<i>P_{G242}</i>	168.785	10.397	16,950.95	172.916	8.928	17,157.23	174.779	10.712	17,044.12
<i>P_{G243}</i>	83.777	11.627	13,706.20	85.656	9.976	13,920.09	86.499	11.993	13,804.78
<i>P_{G7001}</i>	373.321	10.024	20,257.69	383.145	8.653	20,462.10	387.574	10.428	20,350.16
<i>P_{G7002}</i>	474.655	10.152	21,165.67	487.122	8.772	21,370.74	492.737	10.587	21,258.66
<i>P_{G7003}</i>	977.387	9.973	24,128.58	1,003.088	8.606	24,332.35	1,014.687	10.367	24,220.50
<i>P_{G7011}</i>	191.462	9.984	17,603.22	196.502	8.612	17,807.98	198.773	10.373	17,695.93
<i>P_{G7012}</i>	304.020	9.993	19,449.89	312.003	8.620	19,654.27	315.603	10.382	19,542.30
<i>P_{G7017}</i>	347.785	8.853	20,478.92	357.362	7.590	20,676.58	361.704	9.070	20,566.02
<i>P_{G7023}</i>	142.265	10.957	16,044.11	145.784	9.461	16,254.56	147.364	11.431	16,141.12
<i>P_{G7024}</i>	328.475	10.464	19,576.67	336.803	9.029	19,783.58	340.555	10.887	19,670.87
<i>P_{G7039}</i>	451.688	9.915	21,070.69	463.368	8.533	21,274.17	468.643	10.251	21,162.11
<i>P_{G7044}</i>	35.657	9.949	10,899.78	36.586	8.540	11,109.07	37.001	10.246	10,996.11
<i>P_{G7055}</i>	41.639	11.169	11,060.91	42.633	9.597	11,276.02	43.077	11.551	11,161.44
<i>P_{G7057}</i>	143.991	12.348	15,625.63	147.143	10.631	15,842.20	148.556	12.834	15,726.62
<i>P_{G7061}</i>	325.717	11.079	19,318.65	333.562	9.553	19,528.64	337.091	11.524	19,414.89
<i>P_{G7062}</i>	331.700	10.929	19,446.65	339.743	9.419	19,655.84	343.363	11.354	19,542.27
<i>P_{G7071}</i>	130.530	9.739	16,187.62	133.824	8.338	16,390.51	135.314	9.965	16,278.42
<i>P_{G7130}</i>	1,055.663	9.878	24,474.65	1,083.629	8.524	24,677.83	1,096.259	10.266	24,566.20
<i>P_{G7139}</i>	605.697	9.606	22,367.54	621.838	8.271	22,569.46	629.132	9.935	22,457.97
<i>P_{G7166}</i>	415.947	10.169	20,630.59	426.879	8.788	20,835.80	431.805	10.607	20,723.86
<i>P_{G9054}</i>	45.057	9.811	11,887.63	46.255	8.438	12,094.99	46.792	10.139	11,982.46

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์จากการคำนวณด้วยวิธี MCS ของฟังก์ชันแบบไวบูลล์และแบบปกติ
 เปรียบเทียบกับการประเมินพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์จากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ตามวิธีที่นำเสนอ
 ของระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัส ของ IEEE

OPF Variables	MCS						Proposed Method (Weibull parameter estimation)		
	Weibull PDF fit			Normal PDF fit			Shape	Scale	AIC
	Shape	Scale	AIC	Mean	Sigma	AIC			
<i>P_{GT}</i>	20,071.369	2383.517	36784.08	21,082.383	10.166	36,635.50	21,212.900	9.018	36,699.04
<i>P_{G84}</i>	369.269	42.418	20669.09	387.156	10.835	20,452.95	389.882	9.287	20,549.67
<i>P_{G91}</i>	135.692	12.855	15893.75	141.140	13.520	15,601.10	141.996	11.412	15,713.89
<i>P_{G92}</i>	243.536	24.091	18406.13	253.719	12.919	18,120.58	255.316	10.922	18,231.53
<i>P_{G98}</i>	65.244	6.252	13010.33	67.898	13.295	12,731.30	68.314	11.244	12,842.29
<i>P_{G108}</i>	121.089	13.138	15980.81	126.652	11.511	15,754.36	127.502	9.844	15,853.67
<i>P_{G119}</i>	1,641.491	211.443	27094.57	1,729.706	9.618	26,893.82	1,743.308	8.260	26,988.32
<i>P_{G124}</i>	207.431	26.580	18799.39	218.527	9.670	18,598.12	220.240	8.301	18,693.14
<i>P_{G141}</i>	228.440	24.912	18540.13	238.925	11.599	18,283.58	240.562	9.856	18,389.04
<i>P_{G143}</i>	552.256	56.133	21789.67	575.923	12.577	21,504.62	579.643	10.632	21,615.38
<i>P_{G146}</i>	66.292	6.694	13283.83	69.113	12.700	12,991.15	69.563	10.701	13,105.55
<i>P_{G147}</i>	164.777	16.223	16824.46	171.615	13.079	16,520.58	172.703	11.009	16,636.00
<i>P_{G149}</i>	81.173	7.915	13953.88	84.512	13.210	13,648.89	85.045	11.110	13,765.39
<i>P_{G152}</i>	276.805	30.230	19314.06	289.491	11.656	19,042.56	291.493	9.873	19,151.13
<i>P_{G153}</i>	160.715	17.441	17114.08	168.035	11.743	16,839.61	169.194	9.938	16,949.14
<i>P_{G170}</i>	164.387	18.625	17376.70	172.201	11.152	17,124.59	173.424	9.479	17,229.59
<i>P_{G176}</i>	161.035	13.017	15943.64	166.511	16.533	15,539.85	167.421	13.650	15,676.35
<i>P_{G177}</i>	65.146	5.800	12710.42	67.593	14.693	12,363.83	67.992	12.252	12,489.58
<i>P_{G185}</i>	168.254	19.433	17546.63	176.415	10.863	17,311.93	177.683	9.267	17,413.29
<i>P_{G186}</i>	966.775	111.671	24540.99	1,013.624	10.888	24,300.48	1,020.906	9.282	24,402.49
<i>P_{G187}</i>	969.823	112.226	24560.80	1,016.902	10.864	24,321.27	1,024.218	9.263	24,423.08
<i>P_{G190}</i>	464.848	53.893	21626.78	487.548	10.739	21,410.09	491.012	9.204	21,506.87
<i>P_{G191}</i>	1,618.105	205.726	26984.94	1703.779	9.821	26,765.76	1,717.131	8.400	26,864.12
<i>P_{G198}</i>	403.497	45.666	20964.20	422.752	11.036	20,738.99	425.698	9.443	20,837.48
<i>P_{G213}</i>	255.482	27.087	18875.02	266.931	11.885	18,626.15	268.695	10.124	18,729.29
<i>P_{G220}</i>	99.364	11.543	15463.21	104.225	10.720	15,246.23	104.971	9.179	15,344.10
<i>P_{G221}</i>	447.122	52.410	21515.13	469.188	10.603	21,303.03	472.550	9.095	21,399.00
<i>P_{G222}</i>	248.565	28.708	19107.49	260.663	10.778	18,891.17	262.509	9.236	18,988.12
<i>P_{G227}</i>	302.587	35.079	19909.17	317.368	10.730	19,694.67	319.621	9.199	19,791.19
<i>P_{G230}</i>	333.278	38.163	20246.26	349.359	10.896	20,024.24	351.819	9.328	20,122.17
<i>P_{G233}</i>	300.438	34.840	19881.87	315.119	10.726	19,667.59	317.357	9.196	19,764.06
<i>P_{G236}</i>	585.170	67.361	22518.99	613.554	10.824	22,300.35	617.885	9.274	22,397.46
<i>P_{G238}</i>	244.987	28.235	19041.03	256.882	10.813	18,822.07	258.700	9.261	18,919.55
<i>P_{G239}</i>	533.215	61.228	22137.18	559.014	10.857	21,916.98	562.954	9.299	22,014.42
<i>P_{G241}</i>	564.351	65.036	22378.52	591.757	10.807	22,160.86	595.937	9.261	22,257.78
<i>P_{G242}</i>	163.615	17.519	17131.88	171.020	11.745	16,888.32	172.160	10.012	16,990.69
<i>P_{G243}</i>	81.464	7.841	13916.20	84.791	13.231	13,638.09	85.311	11.199	13,748.13
<i>P_{G7001}</i>	361.850	40.159	20450.12	378.700	11.434	20,186.71	381.347	9.702	20,293.49
<i>P_{G7002}</i>	460.325	50.489	21365.78	481.494	11.618	21,091.96	484.838	9.837	21,200.83
<i>P_{G7003}</i>	947.125	105.606	24317.62	991.450	11.359	24,058.89	998.387	9.649	24,164.49
<i>P_{G7011}</i>	185.543	20.666	17792.62	194.217	11.375	17,533.32	195.579	9.657	17,639.60
<i>P_{G7012}</i>	294.620	32.788	19639.05	308.384	11.381	19,380.24	310.542	9.665	19,486.16
<i>P_{G7017}</i>	335.386	41.823	20612.53	352.952	9.870	20,425.75	355.617	8.504	20,517.28
<i>P_{G7023}</i>	138.261	14.105	16264.99	144.191	12.603	15,966.31	145.137	10.616	16,080.82
<i>P_{G7024}</i>	318.751	33.961	19779.58	333.029	11.962	19,504.11	335.278	10.126	19,613.29
<i>P_{G7039}</i>	437.412	49.018	21247.53	458.042	11.219	21,006.40	461.233	9.566	21,108.34
<i>P_{G7044}</i>	34.535	3.856	11077.15	36.158	11.269	10,834.84	36.415	9.578	10,940.42
<i>P_{G7055}</i>	40.466	4.049	11272.74	42.177	12.771	10,988.52	42.450	10.772	11,102.18
<i>P_{G7057}</i>	140.301	12.763	15864.89	145.705	14.210	15,548.07	146.564	11.938	15,665.85
<i>P_{G7061}</i>	316.535	31.941	19534.36	329.999	12.692	19,244.48	332.123	10.718	19,356.37
<i>P_{G7062}</i>	322.202	32.932	19656.50	336.087	12.494	19,374.25	338.269	10.567	19,484.57
<i>P_{G7071}</i>	126.224	14.375	16340.59	132.300	10.890	16,132.70	133.223	9.347	16,228.24
<i>P_{G7130}</i>	1,022.688	115.072	24660.99	1,070.967	11.243	24,405.47	1,078.517	9.556	24,510.45
<i>P_{G7139}</i>	586.061	67.684	22538.14	614.488	10.862	22,303.72	618.889	9.271	22,404.52
<i>P_{G7166}</i>	403.426	44.183	20832.11	421.947	11.644	20,556.32	424.877	9.855	20,665.69
<i>P_{G9054}</i>	43.632	4.938	12066.91	45.707	11.137	11,820.78	46.034	9.463	11,926.50
Number of OPF Runs		1823		1823			6		



ภาพประกอบ 4.10 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าผลิตรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE

ภาพประกอบ 4.9 แสดงการคู่เข้าของการคำนวณ MCS ในระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัส ของ IEEE ซึ่งในกรณีนี้คู่เข้าจากการวนซ้ำ OPF 1823 รอบ ซึ่งต้องใช้เวลาและหน่วยความจำเก็บข้อมูลจำนวนมาก โดยในภาพประกอบ 4.10 แสดงฮิสโตแกรมจากการคำนวณ MCS 2000 รอบ พร้อมทั้งแสดงผลการประมาณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นด้วยฟังก์ชันแบบปกติและแบบไวบูลล์ รวมทั้งการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์ด้วยวิธีที่น่าเสนอ

ค่าพารามิเตอร์ shape และ scale ของฟังก์ชันไวบูลล์ ที่คำนวณจากเปอร์เซ็นต์ไทล์ $10^{th}/90^{th}$, $25^{th}/75^{th}$ และ $40^{th}/60^{th}$ รวมทั้งค่า AIC ของระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บัสของ IEEE ได้แสดงในตารางที่ 4.9 ส่วนในตารางที่ 4.10 ได้แสดงค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตรวมและที่แต่ละบัสของการคำนวณแต่ละวิธี

เมื่อพิจารณาค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตรวมจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์จากการคำนวณ MCS จะเป็นแบบจำลองที่สะท้อนความเป็นจริงมากที่สุดจากค่า AIC ที่ต่ำสุดคือ 36,635.50 ส่วนการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไวบูลล์จากเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่น่าเสนอจะให้ค่า AIC เป็น 36,699.04 ซึ่งต่ำกว่าการประมาณเป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติจาก MCS ที่มีค่า AIC เป็น 36784.08 และผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีที่น่าเสนอของกำลังงานไฟฟ้าจริงที่ผลิตในแต่ละบัสยังเป็นไปในทำนองเดียวกันคือมีค่า AIC ต่ำกว่าการคำนวณโดยประมาณเป็นการกระจายแบบปกติ

จากผลการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง 300 บั๊สของ IEEE ทำให้ยืนยันได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดในเชิงความน่าจะเป็นทางสถิติได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรและเวลาในการคำนวณที่มาก