การศึกษาชุดกังหันน้ำที่มีความเหมาะสมในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับเขื่อนจุฬาภรณ์ ประเทศไทย

Study of Optimal Turbine Set for Pumped Hydro-Storage Power Plant at Chulabhorn Dam, Thailand

สุธินี เวียงดาว จารุพล สุริยวนากุล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาชุดกังหันน้ำที่มีความเหมาะสมกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเขื่อนจุฬาภรณ์ จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย โดยทำการศึกษาชุดกังหันน้ำจำนวน 10 ชุด แต่ละชุดมีกำลังการผลิตรวมเท่ากับ 1,200 เมกะวัตต์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของกังหันน้ำ 3 ชนิด ได้แก่ กังหันน้ำแบบความเร็วรอบคงที่ (FIX) กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเต็มกำลัง (FULL) และ กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟด (DF) โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นสูงที่สุด โดยอาศัยการจำลองข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าของภาคตะวันออกเฉียงเหนือย้อนหลัง 1 ปี จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณหาประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของแต่ละชุดกังหันน้ำโดยพิจารณาตามกราฟคุณลักษณะของกังหันน้ำแต่ละชนิด จากผลการศึกษาพบว่าในการเลือกชุดกังหันน้ำที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพ และค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 0 ชุดกังหันน้ำที่มีเหมาะสม 3 ลำดับแรกได้แก่ ชุดที่ 2 (FULL,FULL,FULL) ชุดที่ 8 (FULL,FULL,DF) และ ชุดที่ 9 (DF,DF,FULL)

คำสำคัญ: กังหันน้ำแบบความเร็วรอบคงที่ กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ

Abstract

This paper presents the study of the optimal turbine set for pumped hydro-storage power plant at Chulabhorn Dam, Thailand. Ten sets of 1,200 MW turbines were investigated with three types of turbines: fixed speed (FIX), variable-speed Doubly Fed Induction Machines (DF), and variable-speed Synchronous Machines Equipped with Full Size Frequency Converter (FULL). The objective to find the best set of turbines with highest efficiency and flexibility was selected for the plant, based on electricity consumption of the Northeast over the past one year. The efficiency and the flexibility are computed from a

characteristic curve of each other type of turbine. As a result, the top three sets is set 2 (FULL,FULL, FULL) set 8 (FULL,FULL,DF) and set 9 (DF,DF,FULL), respectively.

Key words: Fixed Speed Turbine, Variable Speed Turbine, Hydro Storage Power plant

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาโลกร้อนได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ส่งผลให้พลังงานหมุนเวียนได้รับความนิยมในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า [1–3] ซึ่งถือเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานจึงได้รับการผลักดันจากภาครัฐซึ่งสะท้อนผ่านแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan : PDP) เป้าหมายในปี พ.ศ.2579 ต้องมีการใช้พลังงานหมุนเวียนมาผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 52 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ.2560 โดยมุ่งเน้นใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมร้อยละ 30 และ15 ตามลำดับ นับเป็นสัดส่วนที่มากพอจะส่งผลให้การผลิตกระแสไฟฟ้ามีความผันผวนซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของสภาวะอากาศและฤดูกาล [4] จึงจำเป็นต้องอาศัยการชดเชยจากโรงไฟฟ้าที่มีความยืดหยุ่นในการผลิตสูง [5] เพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบมีค่าคงที่ระบบมีความเสถียรและทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับถือเป็นตัวเลือกหลักที่ถูกนำมาชดเชยความผันผวนในระบบ [5], [6] เนื่องด้วยความสามารถที่โดดเด่นในการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตและความเร็วในการเริ่มเดินเครื่องเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าที่เดินเครื่องด้วยน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และนิวเคลียร์ [7] นอกจากนั้นยังสามารถทำหน้าที่เสมือนแบตเตอรี่ในการกักเก็บกระแสไฟฟ้าที่เหลือใช้ภายในระบบได้ โดยกังหันน้ำถือเป็นอุปกรณ์หัวใจหลักในการเดินเครื่อง ซึ่งการเลือกกังหันน้ำที่เหมาะสมต่อการใช้งานช่วยให้การเดินเครื่องมีประสิทธิภาพที่ดี นอกจากนั้นยังช่วยลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศในของเหลว (cavitation) และการสั่น (vibration) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ วิธีเลือกกังหันน้ำคำนวณและพิจารณาความเป็นไปได้จากระดับความสูงของน้ำ (head) [8]

ประเภทของกังหันน้ำสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทตามความเร็วในการหมุนได้แก่ กังหันน้ำแบบความเร็วรอบคงที่ (fixed speed turbine) และกังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้ (variable speed turbine) จากการศึกษาของ Belton V. ทำการเปรียบเทียบรายละเอียดความแตกต่างของกังหันน้ำทั้งสอง [9] จากการศึกษาของ C. Yang เห็นได้ว่าการทำงานของกังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้ในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการเดินเครื่องดีกว่า [10] ทำให้ Beevers D.ศึกษาการเพิ่มความยืนหยุ่นในการเดินเครื่องให้กับกังหันน้ำฟรานซิสแบบความเร็วรอบคงที่ [11] นอกจากนั้นข้อได้เปรียบที่ทำให้กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้มีความน่าสนใจคือใช้เวลาในการตอบสนองอยู่ในระดับมิลลิวินาที [12] สำหรับกังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้สามารถแบ่งย่อยได้ 2 ประเภท โดยแบ่งตามการเลือกใช้ตัวแปลงความถี่ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟด (Doubly Fed Induction Machines (DFIM)) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เครื่องแปลงความถี่แบบเต็มกำลัง (Synchronous Machines Equipped with Full Size Frequency Converter (FSFC)) โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ร้อยละ 10 และ 100 ของพิกัดเครื่องตามลำดับ [9]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบการประเมินประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของการนำกังหันน้ำต่างชนิดมาใช้ร่วมกัน นอกจากนั้นการเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นที่อาศัยการพิจารณาความเหมาะสมโดยพิจารณาจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือทำให้การศึกษานี้สามารถให้ข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงสำหรับกรณีศึกษาที่เชื่อนจุฬาภรณ์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีแนวคิดศึกษาชุดกังหันน้ำที่เกิดจากการรวมกันของกังหันน้ำ 3 ชนิด ได้แก่ กังหันน้ำแบบความเร็วรอบคงที่ (FIX) กังหันน้ำแบบปรับความเร็ว

รอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเต็มกำลัง (FULL) และ กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟด (DF) เพื่อหาชุดกังหันน้ำที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่น โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งพิจารณาเป็นกรณีศึกษาเมื่อติดตั้งที่เขื่อนจุฬาภรณ์ จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย โดยเลือกใช้กังหันน้ำขนาด 400 เมกะวัตต์ (MW) จำนวน 3 เครื่อง เพื่อนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาด 1,200 MW

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ ได้แก่ พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าภายในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือความถี่ทุก 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง และปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนจุฬาภรณ์ [13] โดยใช้ข้อมูลวันที่ 1 กรกฎาคม 2560 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2561 แบ่งเป็น 3 ฤดูกาลได้แก่ ฤดูฝน (rainy) ฤดูร้อน (summer) และ ฤดูหนาว (winter) ตามประกาศกรมอุตุนิยมวิทยา [14]

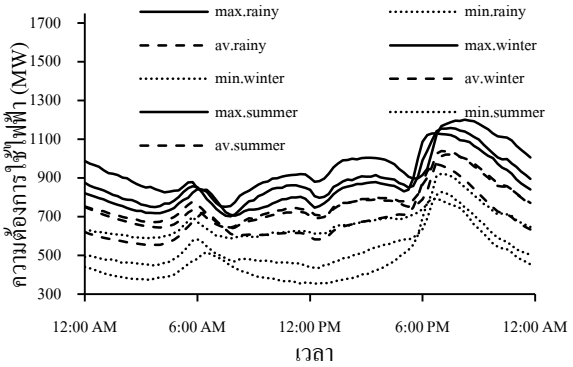
2.2 การจัดเตรียมและวิเคราะห์ข้อมูล

2.2.1 ตัวอย่างพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า

การจำลองพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าจำนวน 1,200 MW โดยใช้ข้อมูลจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมาเทียบบัญญัติไตรยางศ์และคัดเลือกตัวอย่างพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าแต่ละฤดูแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด น้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยในทุก 15 นาที ทำให้ได้ตัวอย่างของพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าจำนวน 9 แบบดังรูปที่ 1

2.2.2 ข้อมูลปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ

ข้อมูลปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละฤดูกาลเพื่อนำค่าความสูงของน้ำไปใช้หาชนิดและประสิทธิภาพของกังหันน้ำ ซึ่งค่าระดับน้ำในฤดูฝน ฤดูหนาว และ ฤดูร้อนมีค่าความสูงสุทธิ 433 438 และ 433 เมตรตามลำดับ



รูปที่ 1 ตัวอย่างพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า

2.2.3 ชุดกังหันน้ำ

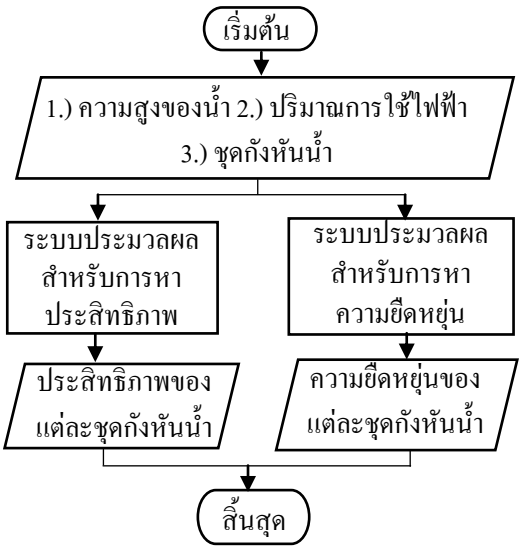
กังหันน้ำที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ กังหันน้ำแบบความเร็วรอบคงที่ (FIX) กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเต็มกำลัง (FULL) และ กังหันน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องแปลงความถี่แบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟด (DF) ขนาด 400 MW จัดเป็นชุดกังหันน้ำกำลังการผลิต 1,200 MW ได้ทั้งหมด 10 ชุด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดชุดกังหันน้ำ

ชุดที่	จำนวนกังหันน้ำ (เครื่อง)			สัญลักษณ์
	FIX	FULL	DF	
1	3	0	0	(FIX,FIX,FIX)
2	0	3	0	(FULL,FULL,FULL)
3	0	0	3	(DF,DF,DF)
4	2	1	0	(FIX,FIX,FULL)
5	2	0	1	(FIX,FIX,DF)
6	1	0	2	(FULL,FULL,FIX)
7	1	0	2	(DF,DF,FIX)
8	0	2	1	(FULL,FULL,DF)
9	0	1	2	(DF,DF,FULL)
10	1	1	1	(FIX,FULL,DF)

2.3 ภาพรวมระบบ

การหาค่าประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของชุดกังหันน้ำเป็นไปดังแผนผังรูปที่ 2 โดยอาศัยข้อมูลความสูงของน้ำ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากตัวอย่างพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า และ ชุดกังหันน้ำในการหาประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของแต่ละชุดกังหันน้ำ



รูปที่ 2 แผนผังภาพรวมระบบ

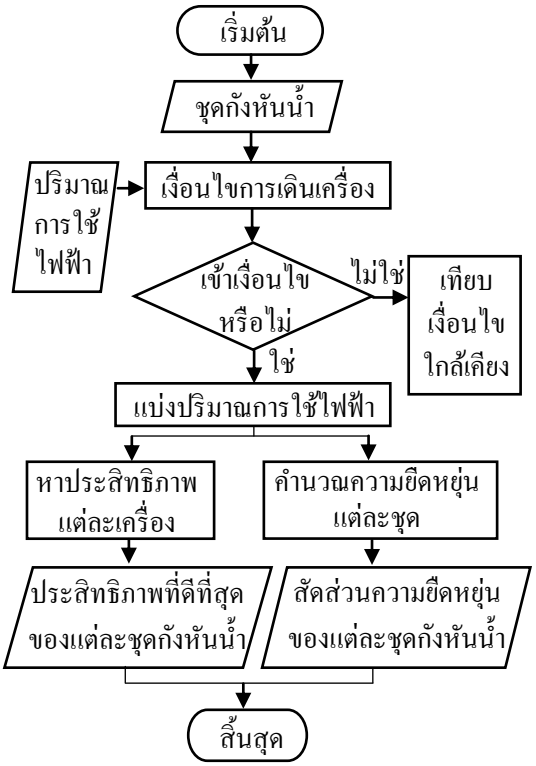
2.3.1 ระบบประมวลผลสำหรับการหาประสิทธิภาพ

การหาค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของแต่ละชุดกังหันน้ำมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3 ซึ่งอาศัยการเขียนโปรแกรมให้กับ Microsoft Excel ทำงานแบบอัตโนมัติด้วยภาษา Visual Basic for Applications (VBA) โดยใช้เงื่อนไขการเดินเครื่องที่พิจารณาจากกราฟคุณลักษณะของกังหันน้ำ [9] เพื่อทำการแบ่งปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า สำหรับบทความนี้ปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าที่สามารถเดินเครื่องได้ในแต่ละเครื่องกังหันน้ำมีค่า 200-400 MW จากนั้นนำค่าปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ต้องทำการผลิตไปคำนวณหาประสิทธิภาพโดยค่าประสิทธิภาพของแต่ละชุดคำนวณดังสมการที่ 1

$$\eta_{set} = \frac{\sum_1^n \eta_n}{n} \qquad (1)$$

โดย η_{set} เป็นค่าประสิทธิภาพแต่ละชุดกังหัน และ n เป็นจำนวนปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าในการทำงาน

2.3.2 ระบบประมวลผลสำหรับการหาความยืดหยุ่น ค่าความยืดหยุ่นสามารถแบ่งออกเป็น 3ลักษณะ คือ การเดินเครื่องที่สามารถเดินเครื่องให้ปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าเท่ากับปริมาณการใช้ไฟฟ้า(เท่ากับ 0) แทนด้วย η^0_{flex} มากกว่าความต้องการ (มากกว่า 0) แทนด้วย η^-_{flex} และ น้อยกว่าความต้องการ(น้อยกว่า 0) แทนด้วย η^+_{flex} โดยคำนวณดังรูปที่ 3 ซึ่งใช้เงื่อนไขการเดินที่พิจารณาจากกราฟคุณลักษณะ [9] ในช่วงที่ให้ค่าประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งอาศัยการเขียนโปรแกรมให้กับ Microsoft Excel ทำงานแบบอัตโนมัติด้วยภาษา Visual Basic for Applications (VBA) จากนั้นนำปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาความยืดหยุ่นและสัดส่วนความยืดหยุ่นของแต่ละชุดดังสมการที่ 2-4 โดยค่าสัดส่วนความยืดหยุ่นที่ให้ความสำคัญ คือ ค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 0 ยิ่งมีค่ามากยิ่งมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนปริมาณการผลิตตามความต้องการของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 ระบบประมวลผลประสิทธิภาพและความยืดหยุ่น

$$\eta_{flex(i)} = P_{out(i)} - P_{in(i)} \qquad (2)$$

โดย $\eta_{flex(i)}$ เป็นค่าความยืดหยุ่นของการเดินเครื่อง $P_{out(i)}$ เป็นค่าปริมาณการผลิตที่สามารถเดินเครื่องได้ และ $P_{in(i)}$ เป็นค่าปริมาณการใช้ไฟที่ต้องการเดินเครื่อง

$$|\eta_{flex}| = |\eta^{0}_{flex}| + |\eta^{-}_{flex}| + |\eta^{+}_{flex}| \quad (3)$$

$$\eta^{0}_{set} = \frac{\eta^{0}_{flex}}{\eta_{flex}}$$

$$\eta^{-}_{set} = \frac{\eta^{-}_{flex}}{\eta_{flex}}$$

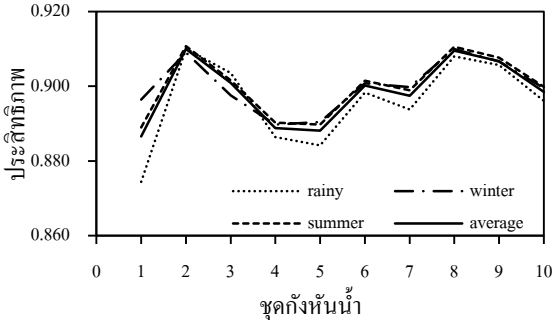
$$\eta^{+}_{set} = \frac{\eta^{+}_{flex}}{\eta_{flex}} \quad (4)$$

3. ผลการศึกษา

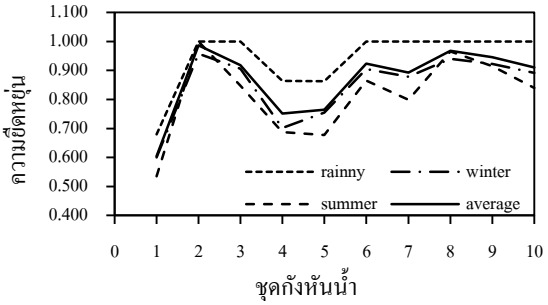
ค่าประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของชุดกังหันน้ำจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4-7 เห็นได้ว่าแนวโน้มข้อมูลจาก 3 ฤดู เป็นไปในทิศทางเดียวกันสามารถใช้ค่าการเฉลี่ยเป็นตัวแทนข้อมูลในการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 8 ทำให้ทราบว่าชุดกังหันน้ำที่มีค่าประสิทธิภาพสูงเป็น 3 ลำดับแรก ได้แก่ ลำดับที่หนึ่ง คือ ชุดที่ 2 (FULL,FULL,FULL) และ ชุดที่ 8 (FULL,FULL,DF) มีค่า 0.910 ลำดับที่สอง คือ ชุดที่ 9 (DF,DF,FULL) โดยมีค่า 0.907 และลำดับที่ 3 ได้แก่ ชุดที่ 3 (DF,DF,DF) โดยมีค่า 0.901 สำหรับชุดที่ให้ค่าสัดส่วนความยืดหยุ่นเท่ากับ 0 สูงเป็น 3 ลำดับแรก ได้แก่ ชุดที่ 2 ชุดที่ 8 และ ชุดที่ 9 โดยมีค่า 0.986 0.968 และ 0.945 ตามลำดับ สำหรับชุดที่ให้ค่าสัดส่วนความยืดหยุ่นมากกว่า 0 น้อยเป็น 3 ลำดับแรกได้แก่ ชุดที่ 2 ชุดที่ 8 และ ชุดที่ 9 มีค่า 0.007 0.021 และ 0.039 ตามลำดับ และชุดที่ให้ค่าสัดส่วนความยืดหยุ่นน้อยกว่า 0 น้อยเป็น 3 ลำดับแรกได้แก่ ชุดที่ 2 ชุดที่ 8 และชุดที่ 9 มีค่า 0.007 0.011 และ 0.016 ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

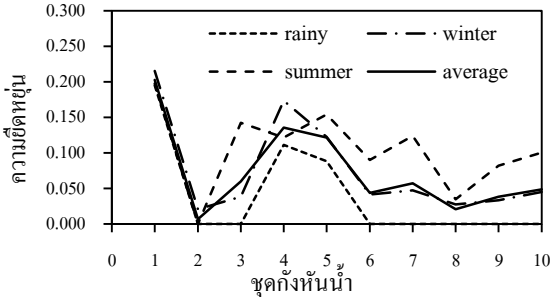
จากการศึกษาพบว่าชุดกังหันน้ำที่มีความเหมาะสมสำหรับเขื่อนจุฬาภรณ์ จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่า 3 ลำดับแรกที่มีความเหมาะสมที่สุด ได้แก่ ชุดที่ 2 (FULL,FULL,FULL) ชุดที่ 8 (FULL,FULL, DF) และ 9 (DF,DF,FULL) ตามลำดับอย่างไรก็ตาม สำหรับการเลือกใช้งานชุดกังหันน้ำที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งานเนื่องจากการเลือกกังหันน้ำที่เหมาะสมในแต่ละโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมีหลากหลายปัจจัยที่ควรพิจารณาโดยความสำคัญของแต่ละปัจจัยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งผลการวิจัยนี้อาจนำไปพิจารณาเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-criteria Decision Analysis : MCDA) เพื่อช่วยให้การตัดสินใจเป็นระบบ และ ยุติธรรม [15], [16]



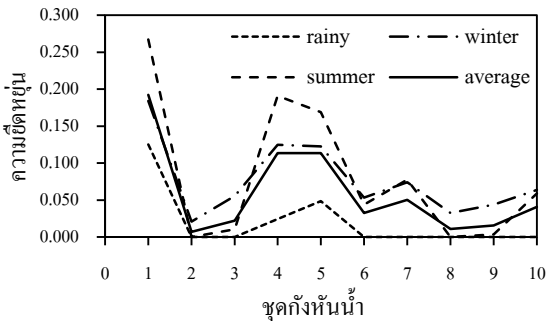
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพของชุดกังหันน้ำตามฤดูกาล



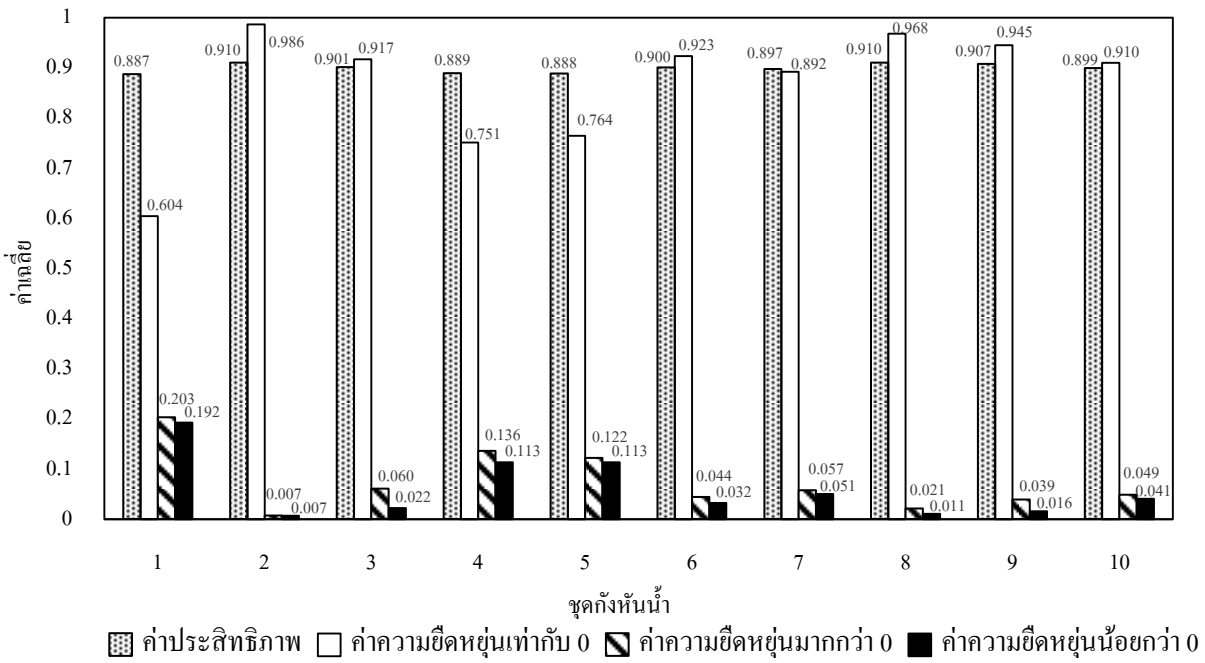
รูปที่ 5 ความยืดหยุ่นของชุดกังหันน้ำเท่ากับ 0 (η^{0}_{flex})



รูปที่ 6 ความยืดหยุ่นของชุดกังหันน้ำมากกว่า 0 (η^{+}_{flex})



รูปที่ 7 ความยืดหยุ่นของชุดกังหันน้ำน้อยกว่า 0 (η^{-}_{flex})



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยด้านประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของแต่ละชุดกังหันน้ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าพลังน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือและฝ่ายปฏิบัติการภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลสำหรับใช้ในบทความนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Heide, L. von Bremen, M. Greiner, C. Hoffmann, M. Speckmann, and S. Bofinger, “Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2483–2489, 2010.

[2] S. Weitemeyer, D. Kleinhans, T. Vogt, and C. Agert, “Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 14–20, 2015.

[3] A. Belderbos and E. Delarue, “Accounting for flexibility in power system planning with renewables,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 33–41, 2015.

[4] W. P. Schill, “Residual load, renewable surplus generation and storage requirements in Germany,” *Energy Policy*, vol. 73, pp. 65–79, 2014.

[5] E. Erayman, “Need for Adjustable Speed Pump Storage Turbines in the Systems Having Large Capacity of Conventional and Pumped Storage Power Plants: A case study for Turkey,” 2016.

[6] E. Ela, B. Kirby, A. Botterud, C. Milostan, I. Krad, and V. Koritarov, “Role of Pumped Storage Hydro Resources in Electricity Markets and System Operation,” *HydroVision Int. Denver, Color. July 23-26, 2013*, no. May, pp. 1–12, 2013.

[7] T. Electric, P. Company, T. Electric, and P. Services, “Final Report on Feasibility Study on Adjustable Speed Pumped Storage Generation Technology Japan International Cooperation Agency (JICA) Tokyo Electric Power Company

Tokyo Electric Power Services," no. January, 2012.

[8] S. Data and N. Head, "Chapter – 3 hydraulic turbine classification and selection 3.1," in *MODERN HYDROELECTRIC ENGINEERING PRACTICE IN INDIA ELECTRO-MECHANICAL WORKS*, 2003, pp. 53–109.

[9] Egat, "Constant Speed & Adjustable Speed Pumped Storage Chulabhorn Power Plant." [Online].Available: http://nehydro.egat.co.th/ dept_maint/images/document/hepco/VSPS_.pdf.

[10] C. Yang, X. Yang, and Y. Chen, "Integration of variable speed hydropower generation and VSC HVDC," *2015 17th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE-ECCE Eur. 2015*, 2015.

[11] D. Beevers, L. Branchini, V. Orlandini, A. De Pascale, and H. Perez-Blanco, "Pumped hydro storage plants with improved operational flexibility using constant speed Francis runners," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 629–637, 2015.

[12] T. Kuwabara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, and K. Mitsuhashi, "Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi Power Station," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, pp. 376–382, 1996.

[13] Phongsakorn.r, "report about water level in dam." [Online]. Available: http://ichpp.egat.co.th /statusdam_report_internet.php.

[14] TMD, "Meteorological Department." [Online]. Available: https://www.tmd.go.th/. [Accessed: 25-Feb-2019].

[15] S. Strategy and A. C. Study, "Fuzzy Logic Based Multi-Criteria Wind Turbine Selection Strategy —A Case Study of Qassim, Saudi Arabia," pp. 1–26, 2016.

[16] R. Mosadeghi, J. Warnken, R. Tomlinson, and H. Mirfenderesk, "Computers , Environment and Urban Systems Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 49, pp. 54–65, 2015.