

การจำลองทางพลวัตของการติดตามจุดกำลังสูงสุด สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน

Dynamics Modeling of Maximum Power Point Tracking for the Variable - Speed Wind Turbine Generator

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความวิชาการนี้คือนำเสนอการเพิ่มสมรรถนะของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันในช่วงความเร็วลมต่ำ (VSWG) โดยใช้การติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT) ในหลักการแล้วค่าสัมประสิทธิ์กำลัง มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความเร็วทิว เพราะฉะนั้นการติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถนำไปใช้งานได้จริง ถ้าตัวควบคุมของกังหันลมสามารถควบคุมค่าความเร็วเชิงมุมของแกนกังหันได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ให้เหมาะสมกับความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอโดยอาศัยชุดคอนเวอร์เตอร์กำลัง ดังนั้นค่าอัตราส่วนความเร็วทิวจะถูกรักษาให้ค่าคงที่ตลอดช่วงความเร็วลม ในขณะที่กังหันลมผลิตได้มากที่สุด ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวผลลัพธ์คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ในความเป็นจริงพลังงานลมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก แบบจำลองทางพลวัตของการติดตามจุดกำลังสูงสุดจึงมีการกำหนดข้อมูลเฉพาะของความเร็วลมประจำท้องถิ่นและค่าสมรรถนะของใบกังหันลมไว้ก่อนล่วงหน้าโดยการวัดและการทดลอง ในบทความวิชาการนี้ผลกระทบของการเปลี่ยน ความเร็วลม และมุมพิชของใบ (9) ต่อตัวแปรที่สำคัญ เช่น กำลังที่กังหันลมผลิตได้ (P_r) สัมประสิทธิ์กำลัง และอัตราส่วนความเร็วทิว ได้ถูกนำเสนอโดยอาศัยการทดลองในห้องทดลองเพื่อใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ ($P_{t_max} - \omega_r$ Curve) ในที่สุดผลการจำลองยืนยันว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันที่ค่าความเร็วทิวคงที่ (ค่าสัมประสิทธิ์กำลังมีค่ามากที่สุด) ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบตลอดช่วงความเร็วลมสามารถผลิตพลังงานได้มากขึ้นประมาณร้อยละ 40 เมื่อเทียบการทำงานที่ความเร็วลมคงที่

Abstract

The objective of this paper is to propose an increasing performance of power generation from a variable - speed wind turbine generator (VSWG) at the low wind speed region by using a maximum power point tracking (MPPT). In principle, a power coefficient value (C_p) of wind turbine, which has the optimum point, depends on a tip - speed ratio (TSR). So the MPPT could be realized, if the wind turbine controller could control the rotation velocity of rotor blades consistently at all time, corresponding to the fluctuation of wind speed via a power converter unit. Then a TSR is maintained constantly at all wind speeds while the maximum energy is being extracted. For this reason the C_p becomes optimum point as a result. In fact, most variations on wind power, the dynamics modeling of the MPPT has to be predetermined by measurements and experiments of local wind speed characteristics and wind turbine performances. In this paper, the effect of varying wind speed and blade pitch angle (β) to the crucial parameters such as a turbine power (P_t), C_p , and TSR are provide by laboratory experiments for formulated a relationship between maximum power and rotational speed (P_{t_max} - ω_r Curve). Finally, simulation results confirm that operating the VSWG at a constant TSR (the maximum value of C_p) corresponding to the relationship between maximum power and rotational speed at all wind speeds could generate approximately 40 percent more energy than a fixed - speed operation.

Key words: Maximum power point tracking (MPPT), Relationship between maximum power and rotational speed

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญกับปัญหาสภาวะโลกร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยในหลายด้าน การแก้ปัญหาดังกล่าวในระยะยาวจึงได้เริ่มดำเนินการขึ้น ตามแผนยุทธศาสตร์พลังงานของกระทรวงพลังงาน⁽¹⁾ โดยกำหนดให้ภายในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยจะต้องเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมจากเดิมให้มากขึ้นเป็น 115 เมกกะวัตต์ (MW) พร้อมกันนี้แผนยุทธศาสตร์พลังงานดังกล่าวยังกำหนดให้หน่วยงานของรัฐเตรียมความพร้อมเพื่อนำเสนอรัฐบาลในการตัดสินใจเกี่ยวกับการพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยเน้นผลการศึกษาในเชิงลึก เรื่องความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการยอมรับของประชาชนตามกรอบปฏิบัติของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ หรือ IAEA (International Atomic Energy Agency) ดังนั้นการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต คาดว่าจะลดความสำคัญของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนจากถ่านหินและก๊าซธรรมชาติลง และเพิ่มการใช้งานโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น ควบคู่กับการทำงานของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นหลักเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานของชาติ

ทั้งในทางทฤษฎีและการทดลองภาคสนามปรากฏชัดแล้วว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผัน⁽²⁾ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากเหตุผลที่สำคัญ คือ ต้นทุนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ลดลง และความก้าวหน้าทางวัสดุศาสตร์ (เช่น high - strength

fiber composite) ทำให้ใบกังหันที่มีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถผลิตพลังงานได้มากขึ้น โดยเฉพาะช่วงความเร็วลมสูง แต่ในช่วงความเร็วลมต่ำ กังหันลมที่ออกแบบสำหรับความเร็วลมสูงจะมีปัญหา เนื่องจากข้อจำกัดทั้งทางกลและทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้นใบพัดของกังหันต้องมีน้ำหนักเบาเพื่อให้หมุนได้ ที่ความเร็วลมต่ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สัมพันธ์กับพลังงานลมที่มีในขณะนั้น หรือกล่าวได้ว่าความเร็วรอบ (ω_r) ของกังหันลมเมื่อเทียบกับความเร็วลม (V) จะต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสม อัตราส่วนความเร็วที่ที่เหมาะสม (TSR_{opt}) โดยอาศัยการติดตามจุดกำลังสูงสุดของใบกังหัน (Maximum power point tracking) หรือ MPPT

ดังนั้นบทความวิชาการฉบับนี้ได้นำเสนอผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญของกังหันลมขนาดเล็ก เช่น จุดกำลังสูงสุด (P_{t_max}) สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) และอัตราส่วนความเร็วที่ (TSP) ต่อการเปลี่ยนความเร็วลมเพื่อใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ ($P_{t_max} - \omega_r$ Curve) ซึ่งมีความสำคัญต่อการติดตามจุดกำลังสูงสุดของกังหันลม นอกจากนี้ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดร่วมกับแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผัน พิกัด 35 kW ยืนยันการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผันที่ดีขึ้น สามารถผลิตพลังงานได้มากขึ้นประมาณร้อยละ 40 โดยเฉพาะช่วงความเร็วลมต่ำเมื่อเทียบกับการทำงานที่ความเร็วลมคงที่ ซึ่งไม่มีการติดตามจุดกำลังสูงสุด

2. ระบบการผลิตพลังงานจากพลังงานลม

2.1 พลวัตของใบกังหันลม

กำลังจากพลังงานลมและกำลังทางกลที่กังหันลม คือ

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.1)$$

และ

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (1.2)$$

โดย P_w คือ กำลังจากพลังงานลม (W)

P_t คือ กำลังที่กังหันลมผลิต (W)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่วงกลมรอบใบกังหัน (m^2)

C_p คือ สัมประสิทธิ์กำลัง

V คือ ความเร็วลม (m/s)

ตามทฤษฎีค่า C_p มีความสัมพันธ์กับจำนวนใบกังหัน หลักอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงใบกังหัน และอัตราส่วนของกำลังทางกลต่อกำลังลม ดังนี้

$$C_p = f(TSR, \mathcal{G}) \quad (2.1)$$

$$= f(V_0, V) \quad (2.2)$$

$$= \frac{P_t}{P_w} \quad (2.3)$$

$$P_w$$

และ

$$TSR = \frac{\omega_r R}{V} \quad (3)$$

โดย R คือ รัศมีของกังหันลม (m)

ω_r คือ ความเร็วรอบ (rad/s)

$\mathcal{G}$ คือ มุมพิชของใบ (Pitch angle) (degree)

V คือ ความเร็วกระแสลมด้านเข้า (m/s)

V_0 คือ ความเร็วกระแสลมด้านออก (m/s)

TSR คือ อัตราส่วนความเร็วทิป

แทนสมการ (2.2) ในสมการ (1.2) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลจากกังหันลมแบบ 3 ใบ และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วกระแสลมขาเข้า (V) และความเร็วกระแสลมขาออก (V_0) คือ

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V^3 \left\{ \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V} \right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \right]}{2} \right\} \quad (4)$$

พิจารณา $\frac{dP_t}{dV_0/V} = 0$ ดังนั้น จะมีค่าสูงสุดในทางทฤษฎี (P_{t_ideal}) เมื่อ $\frac{V_0}{V} = \frac{1}{3}$ จากสมการ (2.2) ค่า C_p สูงที่สุดในอุดมคติ (C_{p_ideal}) จึงเท่ากับ 0.59 แต่ค่า C_p ที่วัดได้จริงจากกังหันลมจะมีค่าน้อยกว่า 0.59 เสมอเพราะข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้สร้างใบ ซึ่งไม่สามารถทนต่อความเค้นจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal stress) ของใบ เมื่อกังหันลมทำงานที่ค่า TSR ค่าสูง หรือ กังหันลมหมุนด้วยความเร็วรอบสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมมากขึ้น

บทความวิชาการฉบับนี้ได้เสนอวิธีการประมาณค่า C_p เป็นความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบกังหันลมด้วยการวิเคราะห์ถดถอยกลับแบบยกกำลัง (Power Regression Analysis)

ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ซึ่งอาศัยผลการทดสอบใบกังหันขนาดเล็กที่ความเร็วลม (V) ค่าต่างๆ เพื่อสังเกตหาค่า TSR ที่ดีที่สุดหรือ TSR_{opt} ซึ่งทำให้ C_p ค่าตามสมการ (2.3) มีค่ามากที่สุด (C_{p_max}) และใกล้เคียงค่า C_{p_ideal} ที่ 0.59 ดังนั้นสมการ (2.1) สามารถเขียนใหม่ คือ

$$C_{p_max} = f(TSR_{opt}, \theta_{min}) \quad (5)$$

โดย θ_{min} คือ มุมพิชของใบค่าน้อยที่สุด (degree)

จากสมการ (1) สมการ (3) และสมการ (5) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ ($P_{t_max} - \omega_r$ Curve) ซึ่งมีความสำคัญต่อการติดตามจุดกำลังสูงสุดของกังหันลม (MPPT) ที่จะนำมาใช้กำหนดจุดการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลม (V) แปรผัน เมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา คือ

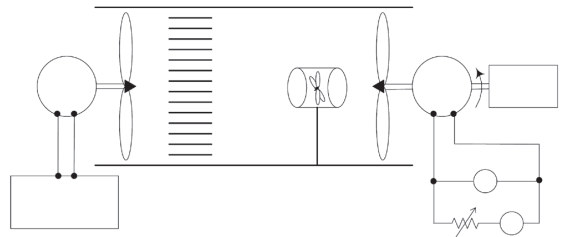
$$\begin{aligned} P_{t_max} &= \frac{1}{2} \rho A V^3 C_{p_max} \quad (6.1) \\ &= \left[\frac{1}{2} \rho A C_{p_max} \left(\frac{R}{TSR_{opt}} \right)^3 \right] \omega_r^3 \quad (6.2) \\ &= K_{blade} \omega_r^3 \end{aligned}$$

และบทความวิชาการฉบับนี้ได้นำสมการ (6.2) มาใช้ออกแบบการติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT) ร่วมกับแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผัน⁽³⁾ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในตอนที 3

2.2 การประมาณค่า P_{p_max} จากการทดลอง

ก. การดำเนินการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย 1. อุโมงค์ลมทรงสี่เหลี่ยมพร้อมชุดจัดระเบียบกระแสลม 2. พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับความเร็วรอบได้ 3. ใบพัดเครื่องบินเล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร พร้อมมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 4. โหลดความต้านทานปรับค่าได้ และ 5. เครื่องมือวัดต่างๆ โดยนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาติดตั้ง ดังแผนผังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบใบกังหันลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร

ข. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ตารางผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะของใบ คือ ($C_{p_max} TSR_{opt}$) และ P_{t_max} กับใบกังหันลมที่ปรับมุมพิช คือ 5 Degree 10 Degree 15 Degree และ 30 Degree (โดยรูปที่ 2 แสดงนิยามของมุมพิชของใบ (θ) ที่ทำมุมเทียบกับระนาบการหมุนของกังหัน และเส้นตรงระหว่างเส้นรอบวงของใบ หรือ Chord of aerofoil) ในอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมคือ 3.5 m / s, 5 m / s 5.8 m / s และ 6.5 m / s ดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 2 ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่า C_{p_max} และ TSR_{opt}
เมื่อ $(\theta) = 5 \text{ deg}$

V (m/s)	ω_r (rad/s)	TSR_{opt}	C_{p_max}	P_{t_max} (W)	P_{t_est} (W)
3.5	136	4.468	0.175	0.19	0.19
4.3	164	4.386	0.165	0.33	0.33
5.0	190	4.37	0.16	0.50	0.52
5.8	222	4.402	0.171	0.85	0.83
6.5	247	4.37	0.16	1.12	1.14

ตารางที่ 3 ค่า C_{p_max} และ TSR_{opt}
เมื่อ $(\theta) = 15 \text{ deg}$

V (m/s)	ω_r (rad/s)	TSR_{opt}	C_{p_max}	P_{t_max} (W)	P_{t_est} (W)
3.5	103	3.37	0.108	0.12	0.12
4.3	129	3.45	0.109	0.22	0.23
5.0	151	3.473	0.110	0.35	0.37
5.8	167	3.311	0.109	0.54	0.50
6.5	194	3.432	0.110	0.77	0.78

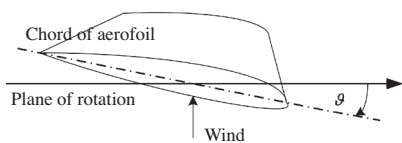
ตารางที่ 2 ค่า C_{p_max} และ TSR_{opt}
เมื่อ $(\theta) = 10 \text{ deg}$

V (m/s)	ω_r (rad/s)	TSR_{opt}	C_{p_max}	P_{t_max} (W)	P_{t_est} (W)
3.5	112	3.67	0.123	0.13	0.14
4.3	140	3.74	0.126	0.25	0.26
5.0	158	3.63	0.12	0.38	0.38
5.8	184	3.65	0.131	0.65	0.60
6.5	211	3.733	0.126	0.88	0.91

ตารางที่ 4 ค่า C_{p_max} และ TSR_{opt}
เมื่อ $(\theta) = 30 \text{ deg}$

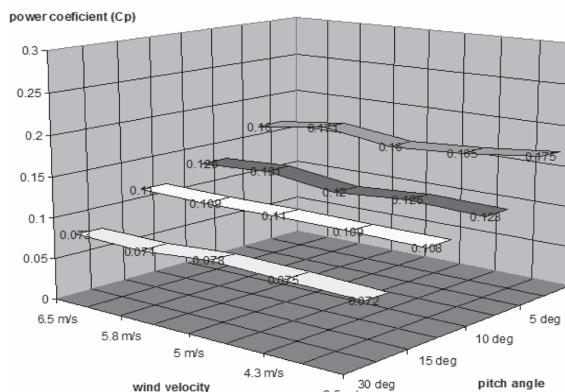
V (m/s)	ω_r (rad/s)	TSR_{opt}	C_{p_max}	P_{t_max} (W)	P_{t_est} (W)
3.5	83	2.73	0.072	0.08	0.08
4.3	104	2.78	0.075	0.15	0.16
5.0	116	2.67	0.078	0.25	0.23
5.8	131	2.60	0.071	0.35	0.32
6.5	155	2.74	0.073	0.51	0.54

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของกังหันลมจะไม่สามารถคาดการณ์ได้อย่างแน่นอน เพราะฉะนั้นจากตารางผลการทดลองทั้งสี่จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังทางกลของกังหันลมโดยประมาณ P_{t_est} จะแม่นยำในช่วงความเร็วลมไม่เกิน 6.5 m/s และมุมพิชของใบไม่เกิน 30 Degree ซึ่งผลการทดลองที่นอกเหนือจากนี้ไม่ถูกนำมาแสดงในบทความ

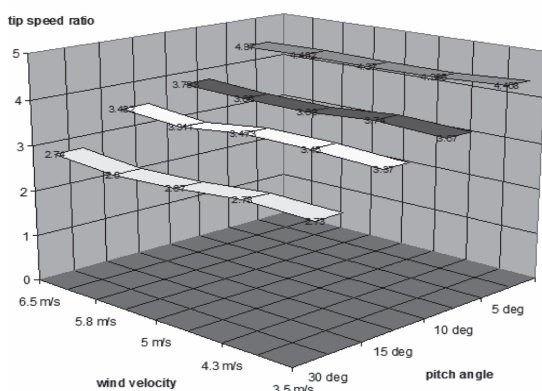


รูปที่ 2 มุมพิชของใบ

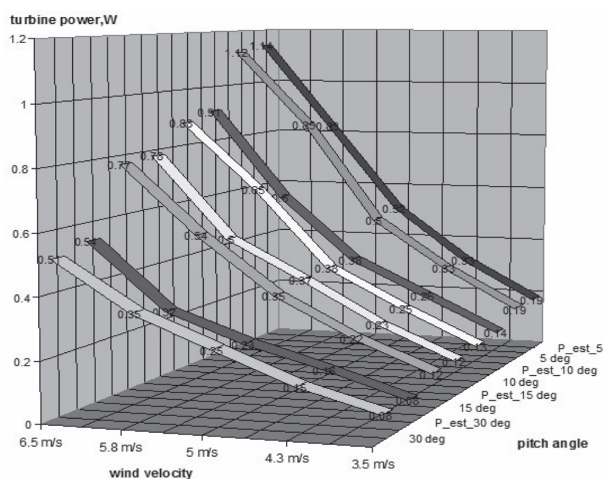
จากตารางผลการทดลองทั้งหมด สามารถวิเคราะห์ได้ 3 ประเด็น ดังนี้ 1. ค่า C_{p_max} จะมีค่ามากที่สุดที่ทุกค่าความเร็วลม (V) เมื่อกังหันลมมีค่า (θ) คือ ค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 2. จุดที่เกิดค่า C_{p_max} คือจุดที่เกิดค่า TSR_{opt} ที่ทุกค่าความเร็วลม และค่า TSR_{opt} จะมีค่าลดลงถ้าค่า (θ) มีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 3. ค่า P_{t_max} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเร็วลมเพิ่มและกังหันลมมีค่า (θ) คือ ค่าน้อยที่สุดจะมีค่า P_{t_max} มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{p_max}(\theta)$ และ V



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $TSP_{opt}(\theta)$ และ V



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{t_max}(\theta)$ และ V

ค. สมการกำลังทางกลสูงสุดของกังหัน โดยประมาณ

กราฟรูปที่ 5 ได้แสดงค่าโดยประมาณของค่า P_{t_max} หรือ P_{t_est} โดยใช้หลักการของ Power Regression Analysis ซึ่งสามารถประมาณค่า P_{t_est} ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงโดยแยกตามกรณีได้ดังนี้

$$P_{t_est} = 7.56 \times 10^{-8} \times \omega_r^3 ; \theta = 5 \text{ deg} \quad (7.1)$$

$$P_{t_est} = 9.69 \times 10^{-8} \times \omega_r^3 ; \theta = 10 \text{ deg} \quad (7.2)$$

$$P_{t_est} = 10.68 \times 10^{-8} \times \omega_r^3 ; \theta = 15 \text{ deg} \quad (7.3)$$

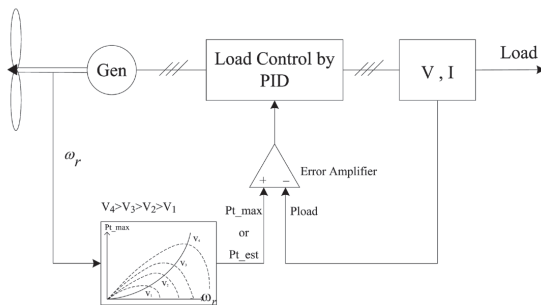
$$P_{t_est} = 14.45 \times 10^{-8} \times \omega_r^3 ; \theta = 30 \text{ deg} \quad (7.4)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (7.1) ถึงสมการ (7.4) ร่วมกับค่าตัวแปรตามตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกลสูงสุดโดยประมาณ (P_{t_est}) และความเร็วรอบ (ω_r) ของเพลากังหันลม สอดคล้องกับความสัมพันธ์ตามทฤษฎีระหว่างค่า P_{t_max} และ ω_r ในสมการ (6.2) ทุกประการ

3. การติดตามจุดกำลังสูงสุดของกังหันลม

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ (P_{t_max} - ω_r Curve) ของกังหันลม พิกัด 35 kW

จากผลการทดลองที่กล่าวมาปรากฏชัดเจนว่า เมื่อกังหันลมทำงานที่อัตราส่วนความเร็วรอบ (ω_r) ของเพลาคู่ค่าความเร็วลม (V) หรือ TSR ณ ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเหมาะสมที่สุด หรือ TSR_{opt} แล้ว กังหันลมจะผลิตพลังงานกลได้สูงสุดหรือ P_{t_max} ที่สัมพันธ์กับพลังงานลมสูงสุดที่ได้จากความเร็วลม (V) ในขณะนั้น จึงเป็นที่มาของการควบคุมการติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT) ของกังหันลมแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การควบคุมการติดตามจุดกำลังสูงสุดของกังหันลม

จากรูปที่ 6 เมื่อค่า ω_r ของกังหันลมถูกวัดแล้วความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ (P_{t_max} - ω_r Curve) ของกังหันลม ซึ่งถูกคำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้โดยอาศัยสมการ (6.2) จะประมาณจุดกำลังสูงสุดของใบ คือ ค่า P_{t_est} แล้วนำค่าดังกล่าวมาเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผัน (VSWG) หรือค่า P_{load} จากนั้นค่าความผิดพลาดที่ได้จะเป็นตัวกำหนดจุดการ

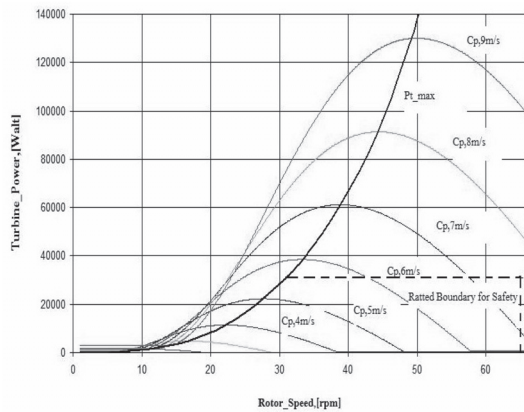
ทำงานของ VSWG ใหม่ (หรือค่า ω_r ที่ทำให้เกิด TSR_{opt}) โดยใช้วงจรถวลีกรรณิกกำลัง เพื่อให้สอดคล้องกับความเร็วลมที่พัดมาในขณะนั้น

บทความฉบับนี้ศึกษาการสร้าง (P_{t_max} - ω_r Curve) ของกังหันลม พิกัด 35 kW ที่ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s จากเงื่อนไขความปลอดภัยจึงกำหนดให้กังหันลมดังกล่าวทำงานที่ค่า TSR_{opt} เท่ากับ 8.1 ดังแสดงในตารางที่ 5 แต่เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบกังหันลม พิกัด 35 kW จริง ดังนั้นค่า C_{p_max} ของกังหันลมดังกล่าว อาจประมาณค่าได้จากความสัมพันธ์ที่มาจากกาสังเกตและการทดลอง (Empirical Formula) เพราะฉะนั้นสมการ (2.1) สามารถเขียนใหม่ คือ⁽⁴⁾

$$C_{p_max} = 0.28 \left(\frac{171.2}{\lambda} - 0.49 - 6 \right) e^{\frac{-19.26}{\lambda}} \quad (8)$$

$$\text{โดยที่} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{TSR_{opt} + 0.089} - \frac{0.035}{\lambda^3 + 1}$$

จากสมการ (8) และค่าตัวแปรในตารางที่ 5 สามารถประมาณค่า C_{p_max} ได้เท่ากับ 0.47 (หากค่า C_{p_max} ไม่ตรงกับค่าที่บริษัทผู้ผลิตให้มาให้ลองปรับค่าตัวเลขในสมการ (8) ใหม่จนกว่าจะให้ค่า C_{p_max} ใกล้เคียงกับค่าจริง) พิจารณาสมการ (6.2) ร่วมกับสมการ (8) จะวาด (P_{t_max} - ω_r Curve) ร่วมกับ C_p - ω_r Curve ที่แต่ละค่าความเร็วลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่ในทางปฏิบัติ กำลังทางกลสูงสุดของกังหันลมต้องถูกควบคุมไม่ให้เกินค่าพิกัดคือ 35 kW และกังหันจะต้องหยุดทำงานเมื่อความเร็วลมเกิน 2 เท่าของความเร็วลมพิกัด คือ 12 m / s ทั้งหมดนี้ด้วยเหตุผลในเรื่องของความปลอดภัย



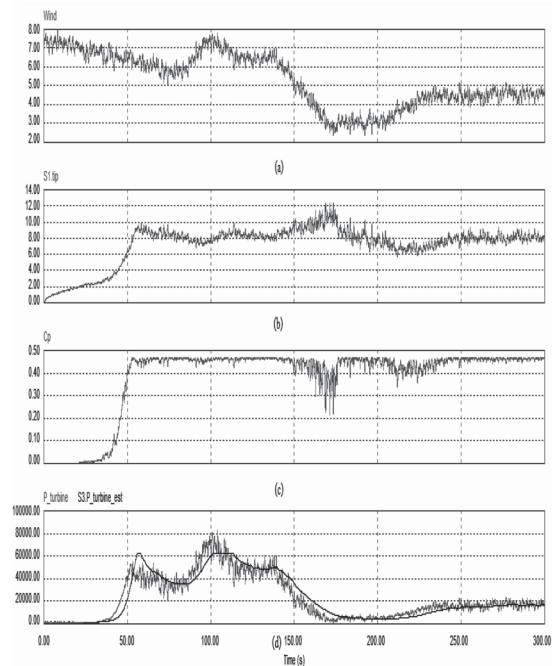
รูปที่ 7 ($P_{t_max} - \omega_r$ Curve) และ ($C_p - \omega_r$ Curve) ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ของกังหันลมพิกัด 35 kW

3.2 ผลการจำลองทางพลวัตของการติดตามจุดกำลังสูงสุดสำหรับ VSWG

อาศัยสมการ (6.2) ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลม แบบจำลองของใบพัดและชุดเพลาทางกล (Drive train) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator) หรือ PMSG⁽⁵⁾ เมื่อค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองดังกล่าวแสดงในตารางที่ 5 อย่างไรก็ตามขั้นตอนการออกแบบและจำลองการทำงานทางพลวัตของการติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วลมแปรผัน (VSWG) สามารถลดความยุ่งยากลงเมื่อใช้โปรแกรมคำนวณเฉพาะทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

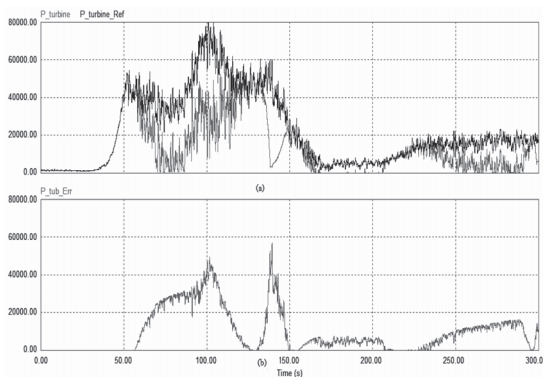
ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรในการจำลองการทำงานของ (MPPT)

ตัวแปรของกังหันลม	
Blade radius	14 m
Moment of Inertia	62993 kg * m ²
TSR_{opt} (at $V = 6$ m/s)	8.1
Air density	1.225 kg/m ³
C_{p_max}	0.47
ตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSM	
Rated output	38 kw
Line – Line Voltage	307 Vrms
Stator resistance	0.029 Ω
d – axis inductance	0.18 mH
q – axis inductance	0.45 mH
No. of poles	4 poles
Moment of Inertia	63.0 kg * m ²
Mech. time constant	9.4
mV _{peak} / rmp	13221.78
ตัวแปรของการติดตามจุดกำลังสูงสุด	
$P_{t_max} = K_{blade} \omega_r^3$	$K_{blade} = 1.0714$
cut – in speed	1.8 m/s
cut – off speed	7.2 m/s



รูปที่ 8 (a) ความเร็วลม (b) ค่า TSR_{opt} (c) ค่า C_{p_max} และ ค่า P_t จริงที่สอดคล้องกับค่า P_{t_max}

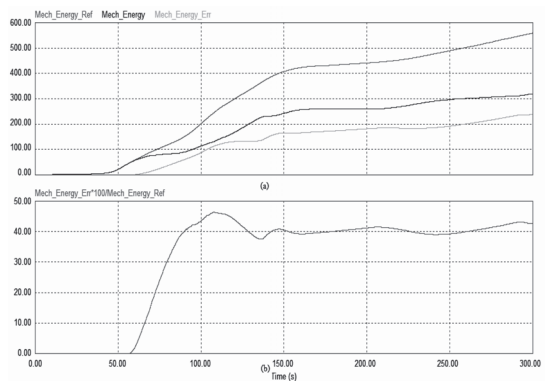
รูปที่ 8 แสดงการทำงานของ MPPT กับ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจาก VSWG เครื่อง กำเนิดไฟฟ้าถูกออกแบบให้เริ่มผลิตพลังงานเมื่อค่า $\frac{dC_p}{d\omega_r} = 0$ โดยการทำงานของ MPPT จะ ควบคุมค่า ω_r ให้สอดคล้องกับความเร็วลมที่ เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รูปที่ 8(a) เพื่อรักษาค่า TSR_{opt} ให้คงที่ คือ 8.1 และ C_{p_max} มีค่า สูงสุด คือ 0.47 รูปที่ 8(b) และ 8(c) ดังนั้น จึงเห็นได้ชัดเจนว่า กำลังที่ผลิตจาก VSWG หรือ (เส้นโค้งไม่เรียบ) จะมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกับค่า กำลังที่ได้จากทฤษฎี หรือ P_{t_max} (เส้นโค้งเรียบ) รูปที่ 8(d)



รูปที่ 9 กำลังทางกลที่ใบกังหันลม บน (a) มี การทำงานของ MPPT ล่าง (a) ไม่มี การทำงานของ MPPT และ (b) กำลัง ทางกลที่ผลิตเพิ่มได้

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ ใบกังหันลม ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบ VSWG ที่มีการทำงานของ MPPT (กราฟเส้นบน) และไม่มีการทำงานของ MPPT (กราฟเส้นล่าง) รูป ที่ 9(a) ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ VSWG ที่มีการทำงานของ MPPT สามารถผลิตกำลังที่ ใบกังหันลมได้มากกว่า รูปที่ 9(b) และรูปที่ 10

แสดงการเปรียบเทียบพลังงานทางกลที่ใบกังหันลม ของการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ VSWG ที่มี การทำงานของ MPPT (กราฟเส้นบน) และไม่มี การทำงานของ MPPT (กราฟเส้นกลาง) ซึ่งการ ผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบ VSWG ที่มีการทำงานของ MPPT สามารถผลิตพลังงานกลที่ใบกังหันลมได้ มากกว่า (กราฟเส้นล่าง) รูปที่ 10(a) ประมาณ ร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับไม่มีการทำงานของ MPPT รูปที่ 10(b)



รูปที่ 10 พลังงานกลที่ใบกังหันลม บน (a) มี การทำงานของ MPPT กลาง (a) ไม่มี การทำงานของ MPPT ล่าง (a) ผลต่าง ของพลังงานกลที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น และ (b) การทำงานของ MPPT สามารถ เพิ่มพลังงานกลที่ใบกังหันได้ประมาณ ร้อยละ 40

4. สรุปผล

ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้ยืนยันว่า การทำงานของการติดตามจุดกำลังสูงสุดของใบ กังหันลม (MPPT) ช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมความเร็วแปรผัน (VSWG) สามารถ ผลิตพลังงานกลเพิ่มขึ้นได้ประมาณร้อยละ 40 โดย เฉพาะย่านความเร็วลมต่ำ เมื่อเทียบกังหันลมที่

พิกัดกำลังเท่ากันในกรณีไม่มีทำงานของการติดตามจุดกำลังสูงสุด และสมรรถนะของการติดตามจุดกำลังสูงสุดของใบกังหันขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างจุดกำลังสูงสุดและความเร็วรอบ ซึ่งแปรผันตรงกับค่าความเร็วรอบยกกำลังสาม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า พ.อ.นันทวงศ์ โชคถาวร ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ตลอดจนการสนับสนุนปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการเขียนบทความฉบับนี้

6. บรรณานุกรม

- (1) สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์, กระทรวงพลังงาน. ยุทธศาสตร์ พลังงาน. มกราคม 2552.
- (2) Song, S.H. and Hahm, N.K., "Implementation and Control of Grid Connected AC/DC/AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.154 - 158, 2003.
- (3) กฤษณ์ รุ่งสุข, ร.ต. "การศึกษาความเหมาะสมของคอนเวอร์เตอร์ ยกแรงดันแบบอินเวอร์สกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน" วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ ส่วนการศึกษา รร.จปร., ปีที่ 6, หน้า 62 - 71, 2551.
- (4) Man, D. T., Sullivan, J. P. and Wasynczuk, O., "Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators during Random Wind Fluctuations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, June 1981, PAS-100(6).
- (5) Anderson, P.M. and Bose, A., "Stability Simulation of Wind Turbine Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 2, November 1983, PAS - 102.