

ตัวจำลองกังหันลมบนพื้นฐานการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่

Wind turbine Simulator based on Constant Volts/Hertz Control Three Phase Induction Motor Drives

ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์^{1*} พัฒน์ อุมวะนะ² ดนุสรณ์ ถามณี² และ วชิรพล เพ็ชรกำแพง²

¹อาจารย์ ²นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
จังหวัดตาก 63000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ เพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสให้มีคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วใกล้เคียงกังหันลม เนื่องด้วยวิธีการควบคุมดังกล่าวเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและไม่ใช้พารามิเตอร์มอเตอร์ ส่งผลให้ความถูกต้องของการควบคุมไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มอเตอร์ นอกจากนี้ยังนำเสนอสมการสำหรับชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ที่สอดคล้องกับวิธีการควบคุมดังกล่าว เพื่อให้ผลตอบสนองทางพลวัตของตัวจำลองกังหันลมใกล้เคียงกับกังหันลมและแก้ปัญหาการขยายสัญญาณรบกวนจากการหาอนุพันธ์ซึ่งนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ ผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แสดงให้เห็นว่าตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอสามารถเลียนแบบกังหันลมได้อย่างถูกต้องทั้งในสภาวะพลวัตและสภาวะคงตัว

Abstract

This article presents the application of the constant Volts per Hertz control to control a three phase induction motor has torque and speed characteristics similar to wind turbine. Due to this method is not complicated and does not require the parameters of motor. As a result, the accuracy of control is independent of variation of the parameters of motor. Furthermore, the equation for compensate the difference between the moment of inertia of wind turbine and motor, which is consistent with the mentioned control method, is proposed. In order to make the dynamic responses of the wind turbine simulator similar to the wind turbine and to overcome the problems of noise amplification from differentiation that leads to instability of the system. The simulation results in Matlab/Simulink program show that the proposed wind turbine simulator can imitate the wind turbine accurately both in dynamic and steady state conditions

คำสำคัญ : ตัวจำลองกังหันลม การควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ

Keywords : Wind Turbine Simulator, Constant Volt/Hertz Control, Induction Motor

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ p.narongrit@mutl.ac.th โทร. 0 5551 1962

1. บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมกำลังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันเนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานสะอาด มีใช้อย่างไม่สิ้นสุด อีกทั้งลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบการแปลงผันพลังงานลมไปสู่ไฟฟ้า (Wind Energy Conversion System) เช่น การคิดค้นและทดสอบอัลกอริทึมของการควบคุมแบบใหม่ การหาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิด การคิดค้นและทดสอบวงจรแปลงผันพลังงาน (Power Converter) แบบใหม่ และการคิดค้นและทดสอบวิธีการเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบต่างๆ เป็นต้น กังหันลมถือเป็นสิ่งจำเป็นแต่ด้วยขนาด ราคา พื้นที่ติดตั้งและสภาพแวดล้อมส่งผลให้กังหันลมถูกแทนที่ด้วยตัวจำลองกังหันลมซึ่งมีราคาถูกกว่ากังหันลม สามารถติดตั้งได้ในห้องปฏิบัติการ และไม่ขึ้นกับความไม่แน่นอนของลมในสภาพแวดล้อม

ในการสร้างตัวจำลองกังหันลมใช้มอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นชุดต้นกำลังแทนกังหันลม เพื่อให้มอเตอร์มีคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วใกล้เคียงกับกังหันลมจึงเกิดวิธีการควบคุมซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น Liu Guangchen et al. (2010) และ Liang Gao et al. (2009) ใช้วิธีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิด (Closed Loop) โดยการปรับกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ด้วยวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ (Controlled Rectifier) เพื่อควบคุมให้มอเตอร์มีคุณลักษณะแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ใกล้เคียงกับกังหันลมแบบมุมพิตคงที่ (Fixed Pitch Wind Turbine) ผลการทดสอบสามารถเลียนแบบกังหันลมได้อย่างถูกต้องในสภาวะคงตัว แต่ไม่มีสมการและผลการทดสอบในสภาวะพลวัต Ovando, R.I. et al. (2007) เสนอวิธีควบคุมในส่วนวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน ส่งผลให้ยานการปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์กว้างขึ้น และมีการพิจารณาผลทางพลวัตของกังหันลมโดยใช้สมการทางกลของกังหันลมแต่ไม่ได้ทำการชดเชยผลความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ Seung-Ho Song et al. (2005) ทำการรวมผลทางพลวัตของกังหันลม นั่นคือผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลม (Tower Effect) และการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสภาวะคงตัว (Steady State Wind turbine Mathematic Model) เพื่อสร้างแรงบิดคำสั่งให้กับการควบคุมแบบลูปปิด สำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่ไม่ได้พิจารณาผลของพจน์การอนุพันธ์ในสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ ผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูง (Wind Shear) ถูกพิจารณาเพิ่มขึ้น Mohammed Monfared et al. (2008) เพื่อสร้างแรงบิดคำสั่งสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลการทดสอบสามารถเลียนแบบกังหันลมได้อย่างถูกต้องในสภาวะคงตัวและสภาวะพลวัต แต่ยังขาดการพิจารณาผลของพจน์การอนุพันธ์ในสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ Bing Gong and Dewei Xu (2008) ทำการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของแรงบิดโดยการปรับกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ แรงบิดคำสั่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสภาวะคงตัวที่มีการรวมสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ และแก้ปัญหาการขยายสัญญาณรบกวนจากการอนุพันธ์ในสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ด้วยการใช้ตัวสังเกตอันดับสอง (Second Order Observer) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำมาใช้แทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากมีราคาถูกกว่า การบำรุงรักษาน้อยกว่า และขนาดเล็กกว่าที่พิกัดกำลังเท่ากัน แต่มีวิธีการควบคุมที่ซับซ้อนกว่า Mohod, S. W. and Aware, M. V. (2010) นำเสนอวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่แบบลูปปิด ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน มีตัวควบคุมเพียงตัวเดียว และไม่ใช้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ ส่งผลให้ความถูกต้องของการควบคุมไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ความเร็วคำสั่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสภาวะคงตัว ส่งผลให้เลียนแบบกังหันลมได้เฉพาะในช่วงสภาวะคงตัวเท่านั้น Cutululis, N. A. et al. (2002) ทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยวิธีควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่แบบลูปเปิด โดยการปรับความถี่ของมอเตอร์ให้สอดคล้องกับคุณลักษณะทางกลของมอเตอร์ จึงมีความยุ่งยากใน

การคำนวณ และความถูกต้องของการควบคุมขึ้นกับพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ความถี่คำสั่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสถานะคงตัว แต่ยังไม่พิจารณาผลทางพลวัตของกังหันลม การควบคุมเวกเตอร์ (Vector Control) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส Abo-Khalil, A. G. (2011) ซึ่งวิธีการนี้ประกอบด้วยตัวควบคุมสองตัวคือตัวควบคุมกระแสแกนตรง (Direct Axis Current Controller) และตัวควบคุมกระแสแกนขวาง (Quadrature Axis Current Controller) และมีการแปลงระนาบอ้างอิง (Reference Frame Transformation) ส่งผลให้เป็นวิธีการที่ซับซ้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลมและผลของความเร็วมุมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูง แต่ไม่ได้พิจารณาถึงผลของความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ Bunlang Neammanee et al. (2007) ใช้วิธีควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส มีการพิจารณาผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลม และผลของความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ในการสร้างแรงบิดคำสั่ง ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ถูกนำมาใช้เพื่อลดผลของการขยายสัญญาณรบกวนจากตัวอนุพันธ์ในสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ Weihao Hu et al. (2008) ทำการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor) ด้วยวิธีควบคุมเวกเตอร์ มีการพิจารณาผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลมและผลของความเร็วมุมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูง แต่ไม่ได้พิจารณาถึงผลของความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ Jiawei Chen et al. (2012) แสดงให้เห็นว่าตัวจำลองกังหันลมที่ไม่พิจารณาผลทางพลวัตของกังหันลมไม่สามารถเลียนแบบกังหันลมได้อย่างถูกต้องในสถานะพลวัตโดยใช้แบบจำลองเชิงความถี่ (Frequency Domain Model) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านกับโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม เพื่อแก้ปัญหาของขยายสัญญาณรบกวนจากการอนุพันธ์ในสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม ยิ่งกว่านั้นในบทความแสดงให้เห็นถึงการขาดเสถียรภาพของระบบเมื่อเลือกค่าคงตัวทางเวลาของตัวความถี่ต่ำผ่านที่ไม่เหมาะสม

บทความนี้นำเสนอสมการสำหรับชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ในอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีการคำนวณไม่ซับซ้อน และไม่เกิดการขยายสัญญาณรบกวนดังบทความที่นำมาข้างต้น สมการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วิธีการควบคุมความเร็ว ในบทความนี้จึงเลือกใช้วิธีการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่แบบลูปิด เพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งเป็นจุดต้นกำลังของตัวจำลองกังหันลมให้มีคุณลักษณะแรงบิดและความเร็ว และผลตอบสนองทางพลวัตใกล้เคียงกับกังหันลมขนาดเล็กแบบมุมพิทคิงที่ เมื่อไม่พิจารณาผลของความเร็วมุมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงและผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลม

2. วิธีการทดลอง

ในบทความนี้ทำการทดลองตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอโดยจำลองการทำงานและทดสอบบนโปรแกรม Matlab/Simulink รายละเอียดของส่วนประกอบหลักๆของตัวจำลองกังหันลม แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

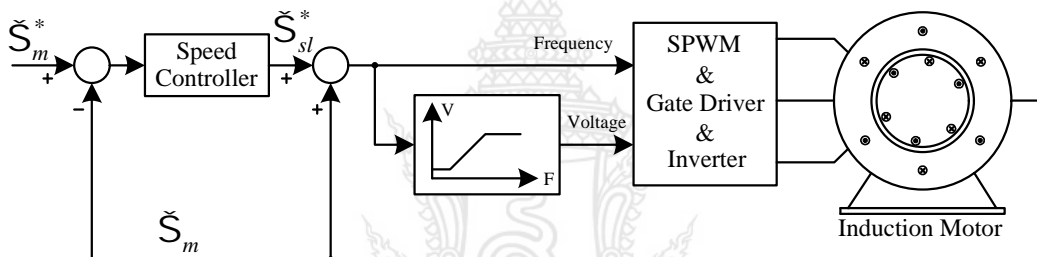
2.1 การควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่แบบลูปิด

ในบทความนี้การควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่แบบลูปิดถูกนำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อให้มอเตอร์มีผลตอบสนองคล้ายคลึงกับกังหันลมทั้งในสถานะคงตัวและสถานะพลวัต แนวคิดของวิธีการควบคุม Mohod, S. W. and Aware, M. V. (2010) พิจารณาจากสมการ (1)

$$T_m = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{\{^2\tilde{S}_{st} R_r\}}{R_r^2 + L_r^2 \tilde{S}_{st}^2} \quad (1)$$

โดยที่	T_m	คือ	แรงบิดของมอเตอร์ [นิวตัน เมตร]
	P	คือ	จำนวนขั้วของมอเตอร์ [ขั้ว]
	$\{$	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ [เวเบอร์]
	\dot{S}_{sl}	คือ	ความเร็วสลลิป [เรเดียนต่อวินาที]
	R_r	คือ	ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ [โอห์ม]
	L_r	คือ	ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ [เฮนรี่]

จากสมการพบว่าสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ด้วยความเร็วสลลิปเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ต่อความถี่ ดังนั้นเพื่อควบคุมให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่ทำได้โดยรักษาอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ต่อความถี่ให้คงที่ และการปรับเปลี่ยนความถี่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ได้ ส่งผลให้การควบคุมแรงบิดและความเร็วแยกอิสระต่อกัน แผนภาพการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่แบบลูปปิดแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่แบบลูปปิด

จากรูปที่ 1 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้า (\dot{S}_m) ที่ไม่เท่ากับความเร็วคำสั่ง (\dot{S}_m^*) (ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโพลตของมอเตอร์หรือความเร็วคำสั่ง) เป็นตัวกระตุ้นให้ตัวควบคุมความเร็วสร้างความเร็วสลลิปคำสั่ง (\dot{S}_{sl}^*) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าสัมพันธ์กับแรงบิดของมอเตอร์ จากนั้นความถี่ที่สอดคล้องกันสร้างจากการรวมกันระหว่างความเร็วสลลิปคำสั่งและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้า ความถี่ที่ได้ถูกแปลงไปสู่แรงดันไฟฟ้าด้วยเช่นกันตามหลักการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่แล้วป้อนเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบคลื่นไซน์ (Sine Wave Pulse Width Modulation: SPWM) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์เป็นสัญญาณที่เหมาะสมต่อการขับนำสวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลังของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ใช้วงจรขับเกต (Gate Driver) แรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากอินเวอร์เตอร์ถูกป้อนเข้าสู่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจึงทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ตามต้องการ

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสถานะคงตัว

กำลังและแรงบิดของกังหันลมแบบมุมพิตคังที่ตามหลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) Jiawei Chen et al. (2012) แสดงดังสมการ (2) และ (3)

$$P_t = 0.5f \dots C_p(\cdot) R^2 v^3 \tag{2}$$

$$T_t = 0.5f \dots C_T(\cdot) R^3 v^2 \tag{3}$$

โดยที่	P_t	คือ	กำลังของกังหันลม [วัตต์]
	T_t	คือ	แรงบิดของกังหันลม [นิวตัน เมตร]
	...	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (Air Density) [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
	R	คือ	รัศมีของใบพัด [เมตร]
	v	คือ	ความเร็วลม [เมตรต่อวินาที]
		}	คือ Tip Speed Ratio ซึ่งเท่ากับ $\frac{\check{S}_t R}{v}$
	\check{S}_t	คือ	ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม [เรเดียนต่อวินาที]

และ $C_T(\check{S}_t)$ คือสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม (Torque Coefficient of Wind Turbine) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (4)

$$C_T(\check{S}_t) = C_p(\check{S}_t) / \check{S}_t \tag{4}$$

โดย $C_p(\check{S}_t)$ คือสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม (Power Coefficient of Wind Turbine) ซึ่งมีสมการดังนี้ Cheng Fangshun et al. (2009)

$$C_p(\check{S}_t) = 0.5176 \left(116 \frac{1}{\check{S}_t} - 5 \right) e^{-21 \frac{1}{\check{S}_t}} + 0.0068 \tag{5}$$

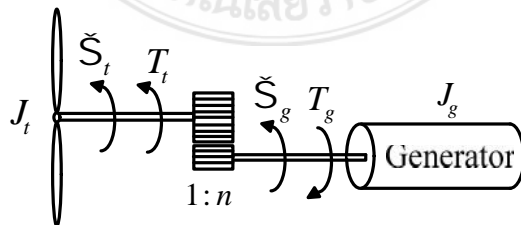
และ

$$\frac{1}{\check{S}_t} = \frac{1}{\check{S}_t} - 0.035 \tag{6}$$

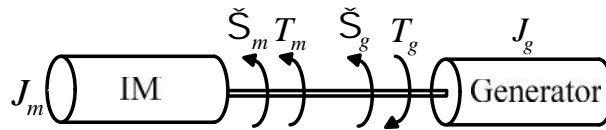
เมื่อพิจารณาให้ตัวแปรอินพุตคือความเร็วลมและความเร็วเชิงมุมของกังหันลม แรงบิดของกังหันลมซึ่งคือตัวแปรเอาท์พุทสามารถหาได้จากสมการ (3) ถึง (6)

2.3 การชดเชยความแตกต่างของโมเมนต์ความเฉื่อย

เพื่อให้ตัวจำลองกังหันลมสามารถเลียนแบบกังหันลมในสภาวะพลวัตได้อย่างถูกต้อง จำต้องรวมผลทางพลวัตที่เกิดขึ้นกับกังหันลมซึ่งได้แก่ ผลของเสาที่เกิดการบังลมของกังหันลม ผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามความสูง และผลความแตกต่างของโมเมนต์ความเฉื่อยระหว่างกังหันลมและมอเตอร์ ซึ่งในบทความนี้พิจารณาเฉพาะผลความแตกต่างของโมเมนต์ความเฉื่อยระหว่างกังหันลมและมอเตอร์เท่านั้น ในการชดเชยความแตกต่างของโมเมนต์ความเฉื่อยพิจารณาจากรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ระบบแปลงผันพลังงานของกังหันลม



รูปที่ 3 ระบบแปลงผันพลังงานของตัวจำลองกังหันลม

จากรูปที่ 2 และ 3 สามารถเขียนสมการอธิบายการเคลื่อนที่เมื่อพิจารณาที่ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Jiawei Chen et al. (2012) และ Cheng Fangshun et al. (2009) ได้ดังนี้

$$\frac{T_t}{n} = \left(\frac{J_t}{n^2} + J_g \right) \frac{d\dot{S}_g}{dt} + T_g \tag{7}$$

$$T_m = (J_m + J_g) \frac{d\dot{S}_g}{dt} + T_g \tag{8}$$

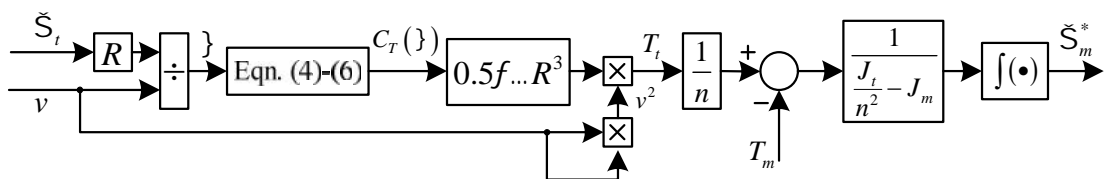
โดยที่	T_g	คือ	แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [นิวตัน เมตร]
	T_m	คือ	แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า [นิวตัน เมตร]
	\dot{S}_g	คือ	ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [เรเดียนต่อวินาที]
	\dot{S}_m	คือ	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้า [เรเดียนต่อวินาที]
	J_t	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม [กิโลกรัม ตารางเมตร]
	J_m	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไฟฟ้า [กิโลกรัม ตารางเมตร]
	J_g	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [กิโลกรัม ตารางเมตร]
	n	คือ	อัตราทดเกียร์

สมการความเร็วคำสั่งที่มีการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ สำหรับการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่แบบลูปิด หาได้จากการพิจารณาให้ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสมการทั้งสองเท่ากัน และเท่ากับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้า แสดงในสมการ (9)

$$\dot{S}_m^* = \frac{1}{\left(\frac{J_t}{n^2} - J_m \right)} \int \left(\frac{T_t}{n} - T_m \right) dt \tag{9}$$

โดยที่ \dot{S}_m^* คือ ความเร็วคำสั่ง [เรเดียนต่อวินาที]

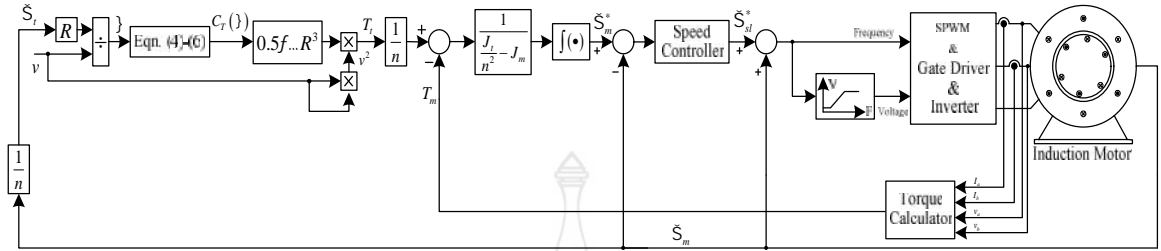
จากสมการจะเห็นว่าไม่มีพจน์การอนุพันธ์ดังนั้นจึงไม่เกิดปัญหาการขยายสัญญาณรบกวน แผนภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมในสภาวะคงตัวร่วมกับสมการ (9) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพการสร้างความเร็วคำสั่ง

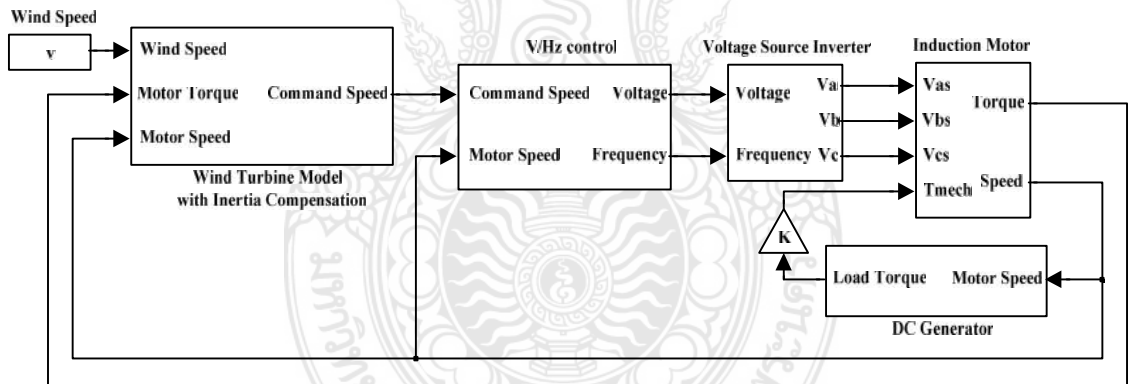
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในการทดลองทำการแปลงระบบโดยรวมของตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบโดยรวมของตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอ

ไปสู่แบบจำลองในโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 6 และเพื่อความง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงทำการยุบระบบเป็นบล็อกๆ ซึ่งประกอบด้วยบล็อกแบบจำลองกังหันลมในสภาวะคงตัวที่มีการรวมการชดเชยความแตกต่างของโมเมนต์ความเฉื่อย บล็อกการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ที่ บล็อกอินเวอร์เตอร์ บล็อกมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส และบล็อกเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งใช้เป็นโหลดให้กับตัวจำลองกังหันลม



รูปที่ 6 แบบจำลองของตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอในโปรแกรม Matlab/Simulink

พารามิเตอร์และพิกัดของกังหันลมและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับจำลองการทำงานมีดังนี้

กังหันลม : รัศมีของใบพัด 2.325 เมตร

ความหนาแน่นของอากาศ 1.185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

โมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม 0.04 กิโลกรัม ตารางเมตร

กำลังพิกัดของกังหันลม 12.7 กิโลวัตต์วัตต์

ความเร็วพิกัดของกังหันลม 300 รอบต่อนาที

ความเร็วสูงสุดของกังหันลม 500 รอบต่อนาที

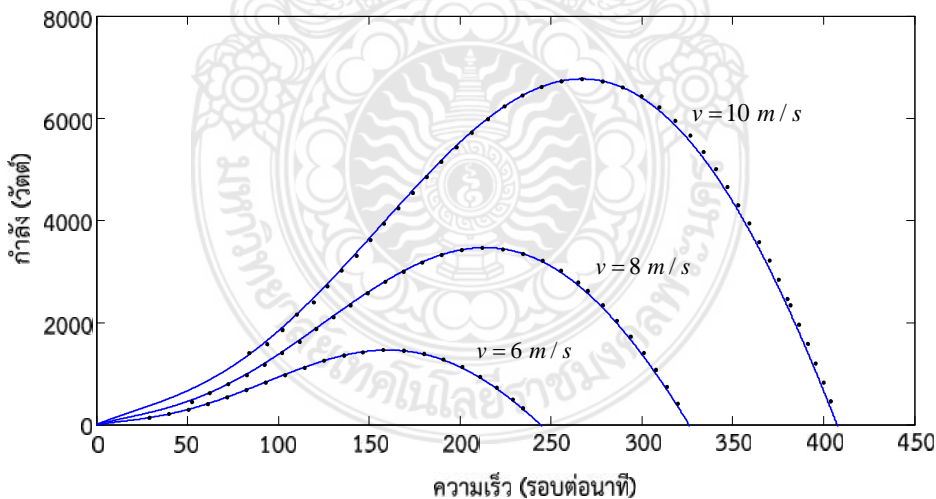
ความเร็วลมพิกัด 12.2 เมตรต่อวินาที

มอเตอร์ : กำลังไฟฟ้าพิกัด 370 วัตต์
จำนวนขั้ว 4 ขั้ว
ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
ความเร็วพิกัด 1360 รอบต่อนาที
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ 7.9×10^{-4} กิโลกรัม ตารางเมตร
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ 29.56 โอห์ม
ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ 23.55 โอห์ม
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ 0.1607 เฮนรี
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ 0.1607 เฮนรี
ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ 0.844 เฮนรี

เนื่องจากพิกัดกำลังของกังหันลมและมอเตอร์ต่างกันมากดังนั้นจึงแปลงระบบให้เป็นแบบระบบต่อหน่วย (Per Unit System) โดยมีแรงบิดฐานของกังหันลมเท่ากับ 500 นิวตัน-เมตร แรงบิดฐานของมอเตอร์เท่ากับ 3.2 นิวตัน-เมตร ความเร็วฐานของกังหันลมเท่ากับ 500 รอบต่อนาที และความเร็วฐานของมอเตอร์เท่ากับ 1360 รอบต่อนาที การทดลองแบ่งเป็นสองส่วนกล่าวคือ การทดลองในสภาวะคงตัวและการทดลองในสภาวะพลวัต

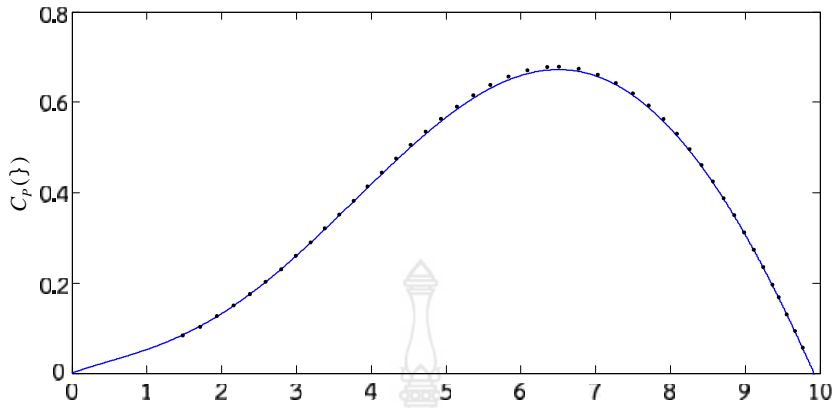
3.1 การทดลองตัวจำลองกังหันลมในสภาวะคงตัว

ในการทดลองนี้ทำการปรับโพลต์ให้กับมอเตอร์เป็นขั้นๆ แล้วทำการวัดค่ากำลังของมอเตอร์และความเร็วที่โพลต์แต่ละค่า เมื่อมอเตอร์มีผลตอบสนองอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว โดยทำการทดลองที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที 8 เมตรต่อวินาที และ 10 เมตรต่อวินาที จากนั้นนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟกำลังและความเร็วของกังหันลมซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2) และ (4) ถึง (6) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟกำลังต่อความเร็วของกังหันลมและตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอ

จากนั้นนำกำลังของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองคำนวณย้อนกลับไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังโดยใช้สมการ (2) เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังต่อ Tip Speed Ratio ที่ได้จากการทดลอง (ตัวจำลองกังหันลม) กับที่หาได้จากสมการ (5) และ (6) (กังหันลม) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 8

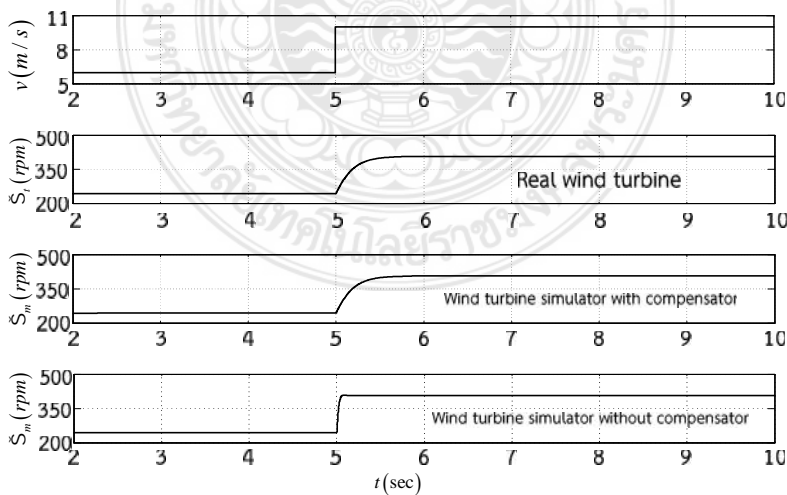


รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังต่อ Tip Speed Ratio จากกังหันลมและตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอ

จากรูปจะเห็นว่ากราฟกำลังต่อความเร็วของตัวจำลองกังหันลม (เส้นประ) มีค่าใกล้เคียงกับกราฟกำลังต่อความเร็วของกังหันลม (เส้นทึบ) โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่ความเร็วลมทั้งสาม และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังต่อ Tip Speed Ratio จากตัวจำลองกังหันลม (เส้นประ) ทับกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังต่อ Tip Speed Ratio จากกังหันลม (เส้นทึบ) โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอสามารถเลียนแบบกังหันลมในสภาวะคงตัวได้อย่างถูกต้อง

3.2 การทดลองตัวจำลองกังหันลมในสภาวะพลวัต

ในส่วนนี้ทำการทดลองเพื่อยืนยันแนวคิดของการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ที่นำเสนอ และเพื่อทดสอบว่าตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอสามารถเลียนแบบกังหันลมในสภาวะพลวัตได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยทำการทดสอบทั้งปรับเปลี่ยนความเร็วลมแบบทันทีทันใดจากความเร็ว 6 เมตรต่อวินาทีไปสู่ 10 เมตรต่อวินาทีที่เวลา 5 วินาที ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเร็วลม ผลตอบสนองทางพลวัตของกังหันลม

ผลตอบสนองทางพลวัตของตัวจำลองกังหันลมที่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อยที่นำเสนอ และผลตอบสนองทางพลวัตของตัวจำลองกังหันลมที่ไม่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อย

จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลตอบสนองทางพลวัตของตัวจำลองกังหันลมที่ไม่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อยเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นเมื่อความเร็วลมเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่ตัวจำลองกังหันลมที่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อยที่นำเสนอมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับกังหันลม แสดงให้เห็นว่าตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อย่างถูกต้อง แต่เมื่อพิจารณาผลตอบสนองสถานะคงตัวพบว่าตัวจำลองกังหันลมที่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อยที่นำเสนอ และตัวจำลองกังหันลมที่ไม่มีตัวชดเชยความแตกต่างโมเมนต์ความเฉื่อยตอบสนองได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกัน

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอตัวจำลองกังหันลมที่มีสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ โดยออกแบบให้สอดคล้องกับวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบควบคุมแรงดันต่อความถี่ และแก้ปัญหาการขยายสัญญาณรบกวนซึ่งอาจนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ ผลการทดลองพบว่าตัวจำลองกังหันลมที่นำเสนอสามารถเลียนแบบกังหันลมได้อย่างถูกต้องทั้งในสถานะคงตัวและสถานะพลวัตและสมการชดเชยความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมและมอเตอร์ สามารถชดเชยผลดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อนหรือวงจรที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีโดยการสนับสนุนของโครงการการวิจัยภาคปฏิบัติและการพัฒนา (Project of Hands-on Research and Development) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และทีมงานที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง

6. เอกสารอ้างอิง

- Abo-Khalil, A. G. 2011. **A new wind turbine simulator using a squirrel-cage motor for wind power for wind power generation systems.** in 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, : 750-755.
- Bing Gong; and Dewei Xu. 2008. **Real time wind turbine simulator for wind energy conversion system.** in IEEE Power Electronics Specialists Conference, : 1110-1114.
- Bunlang Neammanee; SompornSirisumrannukul; and Somchai Chatratana. 2007. **Development of a wind turbine simulator for wind generator testing.** in International Energy Journal, : 21-28.
- Cheng Fangshun; Zhou Bo; and Zhang Le. 2009. **Wind turbine simulator based on DSEM.** in IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, : 2291-2294.
- Cutululis, N. A.; Ciobotaru, M.; Ceanga, E.; and Rosu, M. E. 2002. **Real time wind turbine simulator based on frequency controlled AC servomotor.** in the annals of "Dunarea de Jos", : 97-101.
- Jiawei Chen; Jie Chen; Chunying Gong; and Huizhen Wang. 2012. **Design and analysis of dynamic wind turbine simulator for wind energy conversion system.** in 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, : 971-977.
- Liang Gao; and Yangfan Luo. 2009. **Simulation of imitation of the characteristics of wind turbine based on DC motor with Matlab.** in Sustainable Power Generation and Supply conference, : 1-5.

- Liu Guangchen; Wang Shengtie; and Zhang Jike. 2010. **Design and realization of DC motor and drives based simulator for small wind turbine.** in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), : 1-4.
- Mohammed Monfared; Hossein Madadi Kojabadi; and Hasan Rastegar. 2008. **Static and Dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor.** Renewable Energy, vol.33, no.5, : 906-913.
- Mohod, S. W.; and Aware, M. V. 2010. **Wind energy conversion system simulator using variablespeed induction motor.** in 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, : 1-6.
- Ovando, R.I.; Aguayo, J.; and Cotorogea, M. 2007. **Emulation of a low power wind turbine with a DC motor in Matlab/Simulink.** in IEEE Power Electronics Specialists Conference, : 859-864.
- Seung-Ho Song; Jeong, Byoung-Chang; Hye-In Lee; Jeong-Jae Kim; Venkataramanan, G.; and Jeong-Hun Oh. 2005. **Emulation of output characteristics of rotor blades using a hardware-in-loop wind turbine simulator.** in Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.3, : 1791-1796.
- Weihao Hu; Yue Wang; Xianwen Song; and Zhaoan Wang. 2008. **Development of wind turbinesimulator for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous motor.** in International Conference on Electrical Machines and Systems, : 2322-2326.

