

การศึกษาความเหมาะสม

ของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลีฟ
กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน

A Feasibility Study of an Interleaved Boost
Converter with a Variable Speed Wind
Turbine Generator

บทคัดย่อ

ในระบบการเปลี่ยนพลังงานจากลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันเปลี่ยนรูปพลังงานกลไปสู่พลังงานไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแปรตามความเร็วลมที่เปลี่ยนไป คอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันกระแสตรงสู่กระแสตรงทั่วไปถูกใช้เพื่อรักษาแรงดันบัลลัสกระแสตรงให้คงที่ โดยที่กระแสตรงด้านอินพุตถูกกำหนดให้เป็นตามค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด สอดคล้องกับรูปแบบการสุมของความเร็วลมและคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของใบกังหันลม อินเวอร์เตอร์ด้านกำลังที่มอดูเลตขึ้นแบบสเปซเวกเตอร์ป้อนกระแสลับสู่ระบบสายส่งการไฟฟ้าโดยการควบคุมแรงดันบัลลัสกระแสตรงและองค์ประกอบ กำลังของอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่ากระแสในแกนดี ในทำนองเดียวกันมุมเฟสของกระแสในแกนดีและแกนคิวและแรงดันระบบสายส่งการไฟฟ้าถูกตรวจวัดได้โดยวิธีเฟสล็อกกลูบบนพิกัดอ้างอิงซิงโครนัสแบบแกนดีและแกนคิว เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อได้เปรียบที่คาดหวังจากคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันกระแสตรงสู่กระแสตรง เช่น ลดการสูญเสียจากการนำกระแส เพิ่มพิกัดกำลังของการผลิตกำลังไฟฟ้าและการหักล้างกระแสกระเพื่อมของรูปคลื่นเอาต์พุต ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลีฟทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องจึงถูกนำมาใช้ นำมาซึ่งคอนเวอร์เตอร์กำลังต่อกับระบบไฟฟ้าแบบกระแสลับสู่กระแสตรง สู่กระแสลับที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผลการทดลองสร้างคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลีฟและผลการจำลองคอนเวอร์เตอร์กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันที่ถูกนำเสนอขึ้น แสดงออกถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มสมรรถนะให้ระบบการเปลี่ยนพลังงานจากลมนี้

คำหลัก : เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน คอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลีฟ

Abstract

In the wind energy conversion system, a variable speed wind turbine generator converts the mechanical energy into electrical energy. As the voltage and frequency of the generator output vary along the wind speed change, a conventional DC-DC boost converter is employed to maintain a constant dc-bus voltage. Through the input dc current is regulated to follow the optimized current reference, according to a randomized wind speed pattern and aerodynamic characteristic of wind turbine blades. A line side Space-Vector PWM inverter supplies current into utility line by regulating the dc-bus voltage and the power factor of the inverter can be controlled by regulating d-axis current. Besides, the phase angle of dq-axis current and utility voltage are detected using a phase locked loop (PLL) in dq synchronous reference frame. In order to obtain the promising advantages of DC-DC boost converter such as reduced conduction losses, increase the power processing capability and ripple cancellation of output waveform, an interleaved dual boost converter operating in discontinuous mode (DCM) is adopted, which brings the grid connected AC-DC-AC power converter a higher efficiency. Experimental results of an interleaved dual boost converter and simulation results of the proposed power converter for variable speed wind turbine generator are presented to validate the feasibility of increasing performance of this wind energy conversion system.

Keywords : Variable speed wind turbine generator, Interleaved dual boost converter

1. บทนำ

พลังงานคือ สิ่งที่เป็นที่สุดปรารถนาหนึ่งสำหรับการดำรงชีพของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน การใช้พลังงานจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงได้ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของโลกอย่างรุนแรงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน ดังนั้นการใช้พลังงานจากธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมสภาวะโลกร้อน และวิกฤตการขาดแคลนพลังงานของโลก

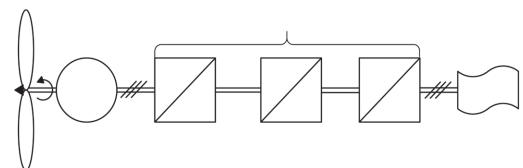
ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันจำนวนมากได้ถูกนำเสนอ ถ่ายทอด และพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด นับตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ยี่สิบบนพื้นฐานความรู้ทางการขับเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นสูงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส โดยได้สร้างมุมมองใหม่ที่น่าสนใจและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางจากนักวิจัยทั่วโลก ถึงความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อพัฒนาการวิจัย

ถ้าไม่นับรวมพลังงานลมที่ความเร็วลมต่ำ (ประมาณ 20% ของพลังงานลมตามทฤษฎี) ซึ่งไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วคงที่ (Fixed speed wind turbine generator) ต้นทุนต่อกิโลวัตต์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมความเร็วคงที่ ยังถือว่าถูกกว่าต้นทุนของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำมันเชื้อเพลิง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งถูกกว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์สุริยะเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบที่ศักยภาพของแหล่งพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นการวิจัยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแปรผันที่ความเร็วลมต่ำ จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบดังกล่าวให้มากขึ้น ซึ่งขึ้น

อยู่กับหลายปัจจัย เช่น การควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลัง คุณภาพของกำลังไฟฟ้า เสถียรภาพระบบไฟฟ้า ระบบทางกลของกังหันลม และเป็นประเด็นที่สำคัญอีกเรื่องหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยทั่วโลกในปัจจุบัน (1),(4)

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นกับคอนเวอร์เตอร์กำลังกรณีที่แรงดันดีซีลิงค์คงที่ (ใช้งานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ยกระดับทั่วไป) คือการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของความร้อนคร่อมที่อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือการสูญเสียจากการนำกระแส (Conduction losses) ของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับพิกัดกำลังและความถี่ของการสวิตซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และมีค่ามากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ตลอดช่วงการทำงานเต็มพิกัด (3),(5)

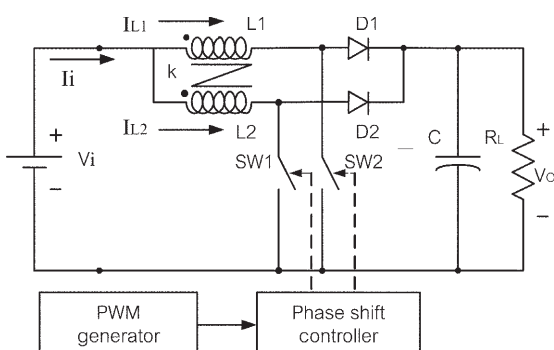
ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ (5),(9) ทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous conducting mode) เพื่อยกระดับแรงดันบัสดกระแสตรงให้เพิ่มขึ้นโดยอาศัยการควบคุมค่ากระแสตรงด้านอินพุต ให้คงที่ตามค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับจุดกำลังสูงสุดของกังหันลม ในขณะที่อินเวอร์เตอร์กำลังสามเฟสทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสดกระแสตรงให้คงที่ และควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อบระบบสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน

2. วงจรและการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ

รูปแบบของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ คือ แนวทางแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานที่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ระดับทั่วไป ซึ่งได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากข้อได้เปรียบของตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ (Coupled inductor) ทำให้คอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลิฟทั้งสองชุดสามารถทำงานพร้อมกันในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous conducting mode) ได้ โดยที่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตัวหลักทั้งสองของคอนเวอร์เตอร์ระดับแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ ยังคงสามารถทำงานในโหมดการนำกระแสไม่ต่อเนื่องได้ตามปกติ (โดยสลับกันทำงานในช่วงเวลาเดียวกัน) จึงสามารถลดการสูญเสียจากการสวิตช์ขิงได้เป็นอย่างดี (5),(9) และสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำคู่ควบได้ (ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของขนาดตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ) นอกจากนี้ยังสามารถช่วยขจัดปัญหาการกระเพื่อม (Ripple) ของรูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 คอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลิฟสองชุดและตัวเหนี่ยวนำคู่ควบหนึ่งชุดที่ใช้ร่วมกัน

ความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 พันด้วยลวดตัวนำในทิศทางเดียวกัน บนแกนเดียวกันเพื่อให้เกิดความเหนี่ยวนำร่วม L_m โดยอธิบายความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำดังกล่าวได้ดังนี้

$$L'_1 = L_1 - L_m \quad (1)$$

$$L'_2 = L_2 - L_m \quad (2)$$

$$L_m = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

โดย

L_1, L_2 คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำ (H)

k คือ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ

L'_1, L'_2 คือ ค่าความรีว้ไหลของตัวเหนี่ยวนำ (H)

L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (H)

เมื่อแต่ละคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลิฟทำงานในโหมดการนำกระแสไม่ต่อเนื่อง จะทำให้เกิดขั้นตอนการทำงานย่อยที่แตกต่างกันของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ หักขั้นตอนในหนึ่งรอบการทำงาน (T) สร้างรูปคลื่นกระแสด้านเอาต์พุตที่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3 โดยอธิบายความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นตอนของหนึ่งรอบการทำงานได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ช่วงเวลา $t_0 - t_1$:

SW₁ ปิด SW₂ เปิด L_1 เริ่มประจุ L_2 เริ่มหยุดคายประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L2} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{-V_o}{L'_1 + L'_2} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 2 ช่วงเวลา $t_1 - t_2$:

SW₁ ปิด SW₂ เปิด L_1 กำลังประจุ L_2 หยุดคายประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L1} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_i}{L_1} \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 3 ช่วงเวลา $t_2 - t_3$:

SW₁ เปิด SW₂ เปิด L_1 เริ่มคายประจุ L_2 หยุดคายประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L1} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{-(V_0 - V_i)}{L_1} \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 4 ช่วงเวลา $t_3 - t_4$:

SW₁ เปิด SW₂ ปิด L_1 เริ่มหยุดคายประจุ L_2 เริ่มประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L1} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{-V_0}{L'_1 + L'_2} \quad (7)$$

ขั้นตอนที่ 5 ช่วงเวลา $t_4 - t_5$:

SW₁ เปิด SW₂ ปิด L_1 หยุดคายประจุ L_2 กำลังประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L2} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_i}{L_2} \quad (8)$$

ขั้นตอนที่ 6 ช่วงเวลา $t_5 - t_6$:

SW₁ เปิด SW₂ ปิด L_1 หยุดคายประจุ L_2 เริ่มคายประจุ อธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง i_{L2} ได้ดังนี้

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{-(V_0 - V_i)}{L_2} \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต (V_0) แรงดันอินพุต (V_i) สามารถอธิบายได้ง่ายขึ้นเมื่อกำหนด $D_1 = D$, $D_2 = D + \delta D$, $L_1 = L_2 = L$ และ $L'_1 = L'_2 = (1-k)L$ โดย D_1 และ D_2 คือ อัตราส่วนเวลาการทำงานต่อคาบการทำงานทั้งหมด (Duty cycle) ของสวิตช์ SW₁ และ SW₂ ตามลำดับ

และคือผลต่างเวลาของ D_1 และ D_2 ดังนั้น

$$V_o = \frac{V_i}{1-(2D+\delta D)} \quad \text{หรือ} \quad V_o = \frac{V_i}{1-(D_1+D_2)} \quad (10)$$

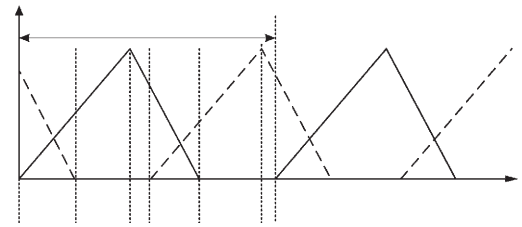
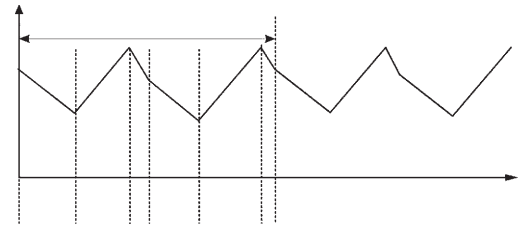
ใช้งานกับภาระโหลด R_L ที่มีเงื่อนไขคือ

$$R_L \leq \frac{16(1-k)^2(1-\delta D)}{T\{[1+2(1-k)(0.5+D)(1-2D-\delta D)]^2 - 4(1-k)(1-\delta D)(1-2D-\delta D)\}} \quad (11)$$

ถ้าบังคับให้ $\delta D \ll 2D$ แล้วผลต่างของ i_{L1} และ i_{L2} คือ

$$i_{L1} - i_{L2} \cong \frac{T\delta D}{4L} [2DV_0 - V_i] \quad (12)$$

พิจารณาสมการที่ (10) ถึง (12) จุดการทำงานที่ดีที่สุดของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเวอร์ลิฟ คือ $V_0 = 2V_i$ และ $i_{L1} - i_{L2} = 0$ ทั้งหมดจะเป็นจริงเมื่อ $D = 0.25$ เท่านั้น (7), (9)



รูปที่ 3 รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเวอร์ลิฟ (ก) กระแสด้านเอาต์พุต (ข) กระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุด

3. ผลการทดลองคอนเวอร์เตอร์ ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ

วงจรต้นแบบคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันแบบอินเตอร์ลิฟเป็นดังแสดงในรูปที่ 2 รายละเอียดของอุปกรณ์ภาคอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ

1. ค่าตัวเก็บประจุ (ความถี่สูง) คำนวณจากค่าอัตราการกระเพื่อมของรูปคลื่นด้านเอาต์พุตที่ 0.01% โดย D คือ อัตราส่วนเวลาการทำงานต่อคาบการทำงานทั้งหมดเฉลี่ยของสวิตช์ และ V_o คือ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

$$C = \frac{D}{R_L \times f \frac{\Delta V_o}{V_o}} = 44 \mu F$$

2. ตัวเหนี่ยวนำคูลูบ คำนวณจากตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดของคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันทั่วไป ในโหมดกระแสต่อเนื่อง บนแกนเทอรอยด์ Micrometals (T520-40D) โดย f คือ ความถี่สวิตซ์ซิง และ R_L คือ ความต้านทานโหลด

$$L_{MIN} = \frac{D(1-D)^2 R_L}{2f} = 6.8 mH \text{ (ต่อขด)}$$

3. สวิตซ์กำลัง ใช้ไอจีบีที (IGBT) เบอร์ HGTG20N60B3D พิกัดกำลัง 600 โวลต์ 40 แอมแปร์

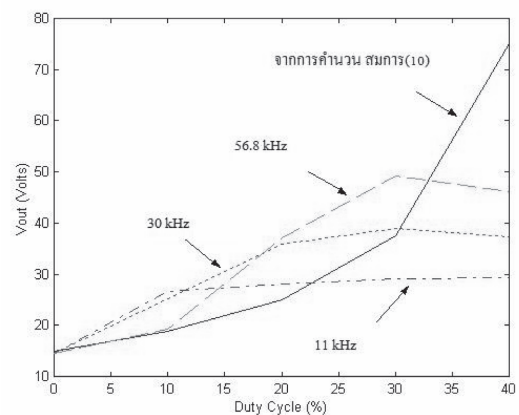
4. ไดโอดกำลัง ใช้ไดโอดกำลังเบอร์ MUR1560 (Fast recovery time) พิกัดกำลัง 600 โวลต์ 15 แอมแปร์

5. วงจรขับขาเกต (Gate drive circuit) ใช้ไอซีเบอร์ IRF 2113 ร่วมกับไอซีออปโตคัปเปอเรอร์เบอร์ 4N25

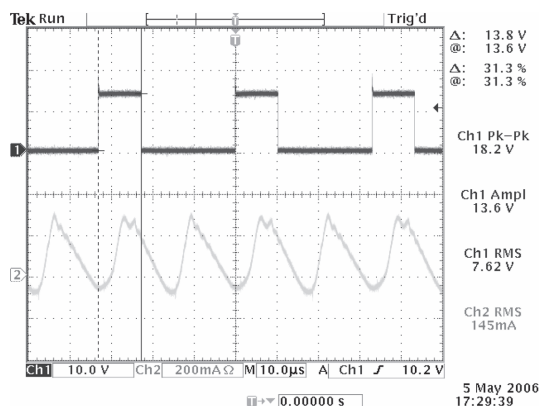
การทดสอบหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเวลาการทำงานต่อคาบการทำงานทั้งหมด (D) กับแรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อใช้แรงดันอินพุต $V_i = 15V_{DC}$ และความต้านทาน $R_L = 1k\Omega$ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แรงดันเอาต์พุตที่ความถี่สวิตซ์ซิงต่างๆ จากการทดลอง

Duty Cycle (D_1, D_2)	แรงดันเอาต์พุต : (V_o)			
	ค่าที่คำนวณ	ที่ 11kHz	ที่ 30kHz	ที่ 56.8kHz
0%	15	14.53	14.53	14.53
10%	18.75	26.59	25.17	19.15
20%	25	28.07	35.91	37.15
30%	37.5	29.06	38.95	49.3
40%	75	29.21	37.20	46.1



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเวลาการทำงานต่อคาบการทำงานทั้งหมด (D) กับแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่ความถี่สวิตซ์ซิงค่าต่างๆ



รูปที่ 5 ขณะคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเตอร์ลิฟ ณ จุดทำงานที่ (1) สัญญาณควบคุม SW_1 (2) รูปคลื่นของกระแส i_i

จากรูปที่ 4 เมื่อเพิ่มความเร็วในการสวิตชิงให้กับคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเวอร์ลิฟ จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วสวิตชิงต่ำๆ อัตราขยายแรงดัน (V_o/V_i) จะต่ำกว่าที่ความเร็วสวิตชิงค่าสูง นอกจากนั้นเมื่อค่าอัตราส่วนเวลาการทำงานต่อคาบการทำงานทั้งหมดเพิ่มขึ้นแล้ว อัตราขยายแรงดันจะลดลง ขอบเขตการทำงานที่ดีจึงมีค่า $D \leq 0.4$ สรุปได้ว่าจุดการทำงานที่ดีและสอดคล้องกับทฤษฎี คือ เลือกใช้ $D = 0.25$ และ $f = 11\text{kHz}$ เพราะทำให้ $V_o/V_i = 2$ ซึ่งมากที่สุด และการสูญเสียพลังงานที่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่ำที่สุด สอดคล้องกับผลการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 5 (ถ้าความเร็วสวิตชิงเพิ่มขึ้นแล้ว การสูญเสียพลังงานที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง)

4. คอนเวอร์เตอร์กำลังและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน

กล่าวโดยสรุป วงจรกำลังและแผนผังระบบควบคุมโดยสังเขปทั้งหมดของคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเวอร์ลิฟซึ่งมีหน้าที่รักษากระแสอินพุตให้คงที่ โดยใช้กระแสอ้างอิงที่สอดคล้องกับจุดกำลังสูงสุดของกังหัน ตลอดช่วงการทำงานที่กว้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet synchronous generator, PMSG)

อินเวอร์เตอร์ด้านกำลังที่มอดูเลตขึ้นแบบสเปซเวกเตอร์ป้อนกระแสสลับสู่ระบบสายส่งการไฟฟ้าโดยการควบคุมแรงดันบัลลัสตรง และองค์ประกอบกำลัง ($\cos\theta$) ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่ากระแสในแกนดี (Direct axis current, i_d) โดยอธิบายหลักการควบคุมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์กำลังที่ถูกลำเสนอจากสมการแรงดัน (8) ดังนี้

$$\frac{di_d}{dt} = \omega \cdot i_q - \frac{1}{L_i} V_d \quad (13)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\omega \cdot i_d + \frac{1}{L_i} (E_q - V_q) \quad (14)$$

$$\frac{C_{dc}}{2} \cdot \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (15)$$

โดย

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของพิกัดอ้างอิงหมุน [rad/s]

i_d, i_q คือ กระแสแกนดีคิว บนพิกัดอ้างอิงหมุน (A)

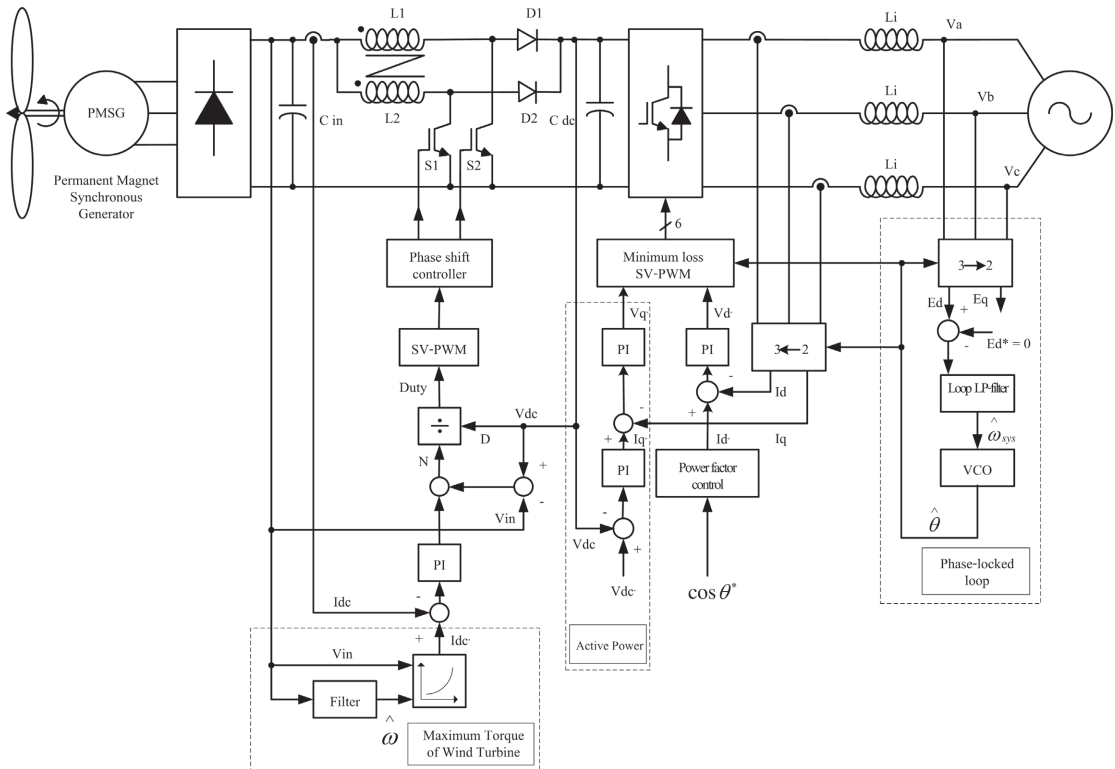
V_d, V_q คือ แรงดันแกนดีคิว บนพิกัดอ้างอิงหมุน (V)

E_q คือ แรงดันระบบสายส่งแกนคิว (V)

P_{in} คือ กำลังที่ได้รับจากพลังงานลม (W)

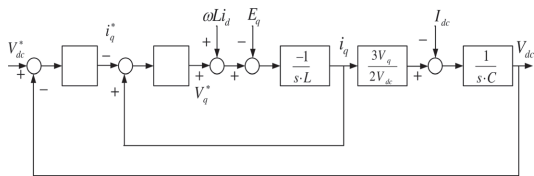
P_{out} คือ กำลังที่อินเวอร์เตอร์จ่ายสู่ระบบไฟฟ้า (W)

จากสมการที่ (13) ถึง (15) สามารถเขียนแผนผังระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ด้านกำลังดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7 ตัวควบคุมแรงดันบัลลัสตรงแบบพีไอ (Proportional-Integral) รักษากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัลลัสตรง (Dc-bus) ให้สมดุล ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงสู่ระบบสายส่งการไฟฟ้า และการควบคุมกระแสวงรอบในต้องทำงานให้ได้รวดเร็วกว่าวงรอบนอกของแรงดัน เพราะต้องทำงาน



รูปที่ 6 คอนเวอร์เตอร์กำลังและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันในงานวิจัย

บนพิกัดอ้างอิงซิงโครนัสแบบแกนดีและแกนคว (dq synchronous reference frame) พร้อมทั้งต้องคอยชดเชยแรงดันย้อนกลับ (Back emf) ให้เหมาะสม



รูปที่ 7 แผนผังระบบควบคุมแรงดันบัส กระแสตรงอินเวอร์เตอร์ด้านกำลัง

นอกจากนี้ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power) สามารถควบคุมด้วยกระแสในแกนคว (Quadrature axis current, i_q) ทั้งหมดอาศัยมุมเฟสของแรงดันระบบสายส่งการไฟฟ้า คำนวณได้จากเทคนิคเฟสล็อกลูป (Phase Locked Loop)(2) โดยตรวจจับความเร็วเชิงมุมของกระแสในแกนดีและแกนควบนพิกัดอ้างอิงหมุนและบังคับ E_d มีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อสามารถตรวจวัดค่ามุมเฟสประมาณ ($\hat{\theta}$) ได้ใกล้เคียงกับค่ามุมเฟสจริง (θ) ตามความสัมพันธ์ คือ

$$E_d = \sqrt{2}V_{ph} \sin(\theta - \hat{\theta}) = 0 \quad (16)$$

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega} \cdot dt \quad (17)$$

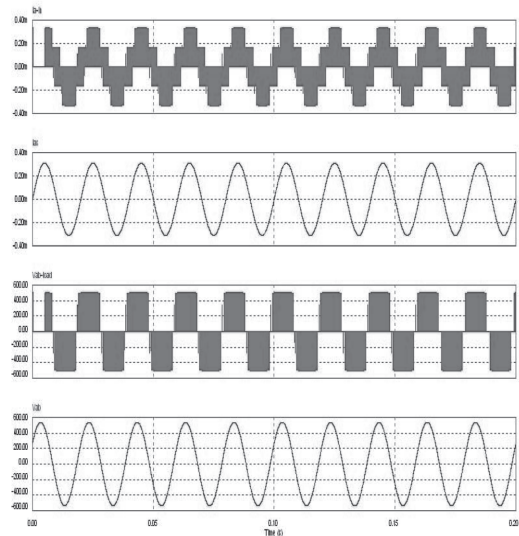
โดย

V_{ph} คือ แรงดันเฟสของระบบสายส่ง [V]

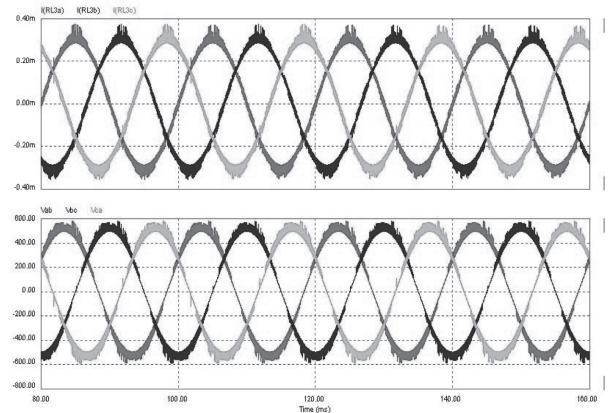
$\hat{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมค่าประมาณ [rad/s]

5. ผลการจำลองคอนเวอร์เตอร์กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผัน

การทดสอบการเชื่อมต่อระบบสายส่งการไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันที่ถูกเสนอแสดงในรูปที่ 6 ด้วยโปรแกรม PSIM™ Version 6 โดยผลการจำลองได้แสดงคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสเฟส ในขณะก่อนการเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง และหลังจากที่มีการเชื่อมต่อกับระบบสายส่ง ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการควบคุมแรงดันเฟสและกระแสเฟสให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของคอนเวอร์เตอร์กำลัง คือ ขนาดแรงดันเท่ากัน (380Vac) ความถี่แรงดันเท่ากัน (50Hz) และมุมเฟสแรงดันเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสเฟส ขณะไม่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งกระแสคอนเวอร์เตอร์ กระแสสายส่ง แรงดันคอนเวอร์เตอร์ และแรงดันสายส่ง ตามลำดับจากบนลงล่าง



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสเฟส ขณะเชื่อมต่อกับระบบสายส่งกระแสคอนเวอร์เตอร์ และแรงดันคอนเวอร์เตอร์ตามลำดับ

นอกจากนี้ผลการจำลองในขณะเชื่อมต่อกับระบบสายส่งยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมกระแสเฟสให้เป็นรูปคลื่นไซน์ สมดุล กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) ต่ำ

6. สรุป

จากผลการทดลองสร้างคอนเวอร์เตอร์ยกแรงดันคู่แบบอินเวอร์ลิฟ และผลการจำลองคอนเวอร์เตอร์กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมความเร็วแปรผันที่ถูกนำเสนอ แสดงออกถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มสมรรถนะให้ระบบการเปลี่ยนพลังงานจากลมนี้ สร้างความมั่นใจและความคุ้มค่าในการลงทุนพัฒนางานวิจัยต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พันเอก รองศาสตราจารย์ นันทวงศ์ โชคถาวร สำหรับคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ สนับสนุน และเอื้อเฟื้อปัจจัยที่จำเป็นมาโดยตลอด และขอขอบคุณ พันเอก ดร.อนูรัตน์ อินกัน สำหรับกำลังใจในการเขียนรายงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

(1) Chen, Z. and Spooner, E., "Wind Turbine Power Converters : A Comparative Study", IEE Power Electronics and Variable Speed Drives, pp. 471-476, 1998.

(2) Chung, S.K., "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems", IEE Proceeding Electronics Power Applications, pp. 213-219, 2000.

(3) Helle, L. and Stig, M.N., "Comparison of Converter Efficiency in Large Variable Speed Wind Turbines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 628-634, 2001.

(4) Hoffmann, R. and Mutschler, P., "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 886-893, 2000.

(5) Huang, X. and Xu, X., "Parasitic Ringing and Design Issues of High Power Interleaved Boost Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 30-35, 2000.

(6) Jones, R., "Power Electronic Converters for Variable Speed Wind Turbines", IEE The Institution of Electrical Engineers, pp. 1/1- 1/8, 1997.

(7) Lee, P.W. and Lee, Y.S., "Steady-State Analysis of an Interleaved Boost Converter with Coupled Inductors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 787-795, 2000.

(8) 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.

(9) Veerachary, M. and Senju, T., "Modeling and Analysis of Interleaved Dual Boost Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 718-722, 2001.