

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์ A Design of Power Converter Circuit for 1 kW Wind Turbine Generator

วสันต์ เพชรพินุล¹ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์² และสันติภาพ โคตทะเล³

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่มีแรงดันและความถี่ด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม ซึ่งมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้า และความถี่ด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบระดับ โดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวชดเชยระบบแบบพีไอ และสร้างสัญญาณควบคุมชนิดเฉลี่ยความกว้างพัลส์ ที่ควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล วงจรpush-pullคอนเวอร์เตอร์ เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 600 โวลต์ และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยผลการทดลองพบว่าระบบสามารถยกระดับแรงดันได้ตามที่ออกแบบไว้ได้ และสามารถรักษาระดับแรงดันในช่วงพักคือ 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า ช่วง 58-70 โวลต์

คำสำคัญ : กังหันลมผลิตไฟฟ้า, วงจรเรียงกระแส, วงจรทบระดับ, วงจรpush-pullคอนเวอร์เตอร์, วงจรอินเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents a design of power converter circuits for wind turbine applications. According to the changing of wind speed, the output voltage and frequency of generator are varied and controlled by a power converter, composed of a three phase rectifier, a boost converter with closed loop PI controller and a Pulse width modulation (PWM) Inverter. These systems are implemented in the digital signal system by digital signal processor (DSP). The simulator and experimental results show the benefit of power converter that can control the output voltage up to 600 V with the input voltage about 58-70 V.

Keywords : Wind turbine generation, Rectifier, Boost Converter, Push - Pull converter, Inverter.

¹อาจารย์ประจำภาควิชาโปรแกรมวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ศูนย์ตาก

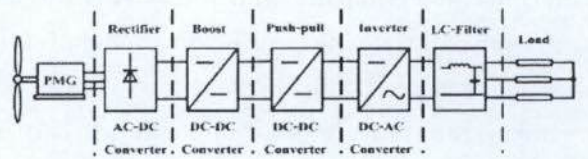
1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น และเชื้อเพลิงที่ใช้เข้ามาผลิตพลังงานไฟฟ้าจะมาจากพลังงานธรรมชาติ เช่น แก๊ส ถ่านหิน น้ำมัน แต่พลังงานธรรมชาติที่กล่าวมานั้นวันจะลดน้อยลงจนหมดไปในอนาคต ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงมีความสำคัญในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานที่น่าสนใจคือพลังงานลม ซึ่งพลังงานที่ได้จากกังหันลมนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าทุกช่วงที่ความเร็วที่มาปะทะกับใบของกังหันลม เนื่องจากความเร็วลมในธรรมชาตินั้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงตามสภาวะความเร็วลม มีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามความเร็วลมที่มากกระทำคือใบพัดของกังหันลม และแรงดันที่ออกจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่ได้นั้นมีแรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำถ้าจะนำไปใช้งาน ได้นั้นควรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน และความถี่ที่ใช้ในประเทศ ซึ่งมีวิธีที่ทำให้แรงดันสูงขึ้นได้หลายวิธี เช่นผ่านหม้อแปลงให้มีแรงดันที่ต้องการ และอีกวิธีคือใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานคือวงจรแปลงผันกำลังงาน หรือ วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้า และยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่ต้องการ และแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน และความถี่ที่ใช้งาน

2. ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรถูกต่อโดยตรงกับกังหันผลิตไฟฟ้าโดยเงื่อนไขทางกลอย่างง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมหรือระบบที่มีเกียร์ร็อกซ์ที่ทำให้มีน้ำหนักเพิ่ม กำเนิดเสียงดังรบกวนเมื่อระบบกำลังทำงาน จำเป็นต้องบำรุงรักษาและเพิ่มค่ากำลังสูญเสีย การบำรุงรักษาระบบเกียร์ร็อกซ์มันยุ่งยากเพราะ nacelle ถูกติดตั้งตำแหน่งสูงสุดของเสา

และมีปัญหาเรื่องวัสดุที่นำมาสร้างและอายุการใช้งานของลูกปืน เงื่อนไขดังกล่าวสามารถละเลยได้เมื่อนำมาใช้กับระบบที่ไม่มีเกียร์ร็อกซ์ เสียงที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการเคลื่อนของเพลลาซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้ และประสิทธิภาพพร้อมกับความน่าเชื่อถือสามารถแสดงได้ โดยการลดน้ำหนักและเพิ่มการบำรุงรักษาระบบ อย่างไรก็ตามระบบกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลมจะควบคุมกำลังสูงสุดได้ยากเมื่อความเร็วของลมเปลี่ยนแปลงตลอด



รูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณากำลัง และแรงบิดเชิงกลที่สร้างจากกังหันลม ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) [1]

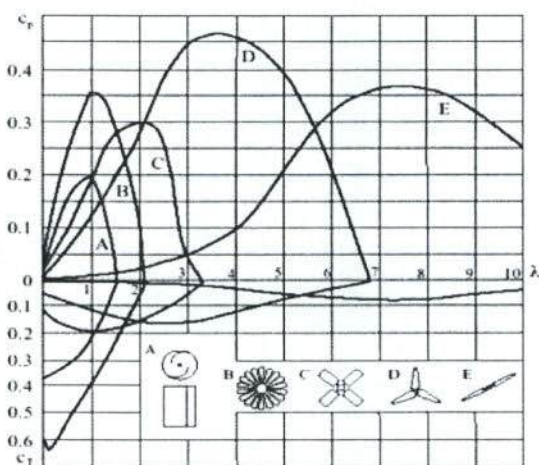
$$P_m = \frac{1}{2} C_p r \rho R^2 u^3 \tag{1}$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T r \rho R^3 u^2 \tag{2}$$

เมื่อ P_m , T_m คือ กำลังและแรงบิดเชิงกลที่ถูกสร้างจากกังหันลมตามลำดับ, ρ คือ ความหนาแน่นของลม (Kg/m^3), R คือ รัศมีของใบพัด (m), u คือ ความเร็วของลม และ, คือ C_p , C_T สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิดของกังหันลมตามลำดับ เมื่อความเร็วของลมเปลี่ยน ความเร็วเชิงมุมของเพลลา ω_m ถูกปรับเพื่อให้ได้ค่า C_p ที่เหมาะสมที่สุด นั่นหมายถึง ω_m และความเร็วลมจะหลอมรวมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรเดียว และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ ω_m ได้สำหรับตัวแปรเดียวนี้ถูกเรียกว่า อัตราส่วนของความเร็วจุดปลายสุด $R\omega_m$ ต่อความเร็วลม อัตราส่วนความจุดปลายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{u} \tag{3}$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลากังหันลม (rad/sec) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ λ สำหรับแต่ละชนิดของกังหันลมแสดงได้ในรูปที่ 2 [2] จากสมการที่ (3) ค่า C_p และ C_T เป็นฟังก์ชันของ λ โดยมีความสัมพันธ์คือ $C_T = C_p / \lambda$ จากรูปที่ 2 เราจะเลือกชนิดของกังหันที่ให้กำลังออกมาสูงสุด ดังนั้นในการจำลองการทำงานที่ความเร็วต่างกัน ความเร็วเชิงมุมควรจะถูกควบคุมให้ทำงานที่ค่า λ ใกล้เคียง 3.8 (จากกราฟ กังหันลมชนิด D ถูกเลือก) โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะจ่ายไปที่โหลด การควบคุมอัตราส่วนคาบเวลาของวงจรทระดับ และดัชนีการมอดูเลชันของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้ ซึ่งอธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของระหว่าง, C_p , C_T และ λ ของกังหันลมต่างๆ

3. ส่วนประกอบของระบบ (System Components)

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทระดับ วงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1. แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

สมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงแกนนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (4)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าด้านออก, i คือกระแสไฟฟ้าด้านออก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R คือ ความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ค่า d และ q คือองค์ประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ [3] และ s คือกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อยูนิท (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อยูนิทสามารถหาได้ใน [5] เส้นแรงแม่เหล็กค้ำสามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} \quad (6)$$

$$\psi_{ds} = (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} + \psi_f \quad (7)$$

เมื่อ ψ_f คือ เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย สภาวะชั่วคราวจะละเลย [1] ดังนั้นสมการที่ (6) และ (7) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (4) และ (5) ได้ ดังนี้

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \quad (8)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} \quad (9)$$

เมื่อ L_{qm} , L_{dm} คือค่าความเหนี่ยวนำรวมในแกน q และ d ตามลำดับ และ L_{os} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสเตเตอร์ แรงบิดในช่องอากาศ T_{sg} สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{sg} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{qs} i_{ds} \quad (10)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \quad (11)$$

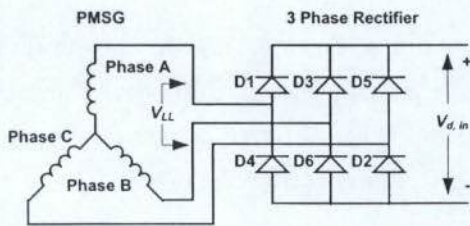
$$Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (12)$$

3.2. วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส (Three-phase rectifier)

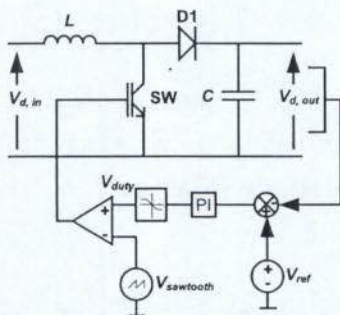
วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรง่าย ราคาถูก และใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ข้อเสียของไดโอดคือไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าไหลได้สองทางได้ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยละเลยเงื่อนไขการเหลื่อมกัน

$$V_{d,in} = \frac{3\sqrt{2}V_{LL}}{\pi} \quad (13)$$

เมื่อ $V_{d,in}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสหรือแรงดันด้านเข้าวงจรทระดับ V_{LL} คือ แรงดันสายด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3 วงจรเรียงกระแสสำหรับระบบกักเก็บผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรทระดับ

3.3. วงจรทระดับ (Boost Converter)

รูปที่ 4 แสดงวงจรทระดับแรงดันและการควบคุม ซึ่งวงจรมีแรงดันด้านออกปกติจะมากกว่าแรงดันด้านเข้าเสมอ วงจรทระดับจะควบคุมแรงดันด้านออกโดยใช้การควบคุมความเวลาการสวิทช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก และกระแสของวงจรทระดับสามารถแสดงได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{d,out}}{V_{d,in}} = \frac{I}{I-D} \quad (14)$$

$$\frac{I_{d,out}}{I_{d,in}} = I-D \quad (15)$$

เมื่อ $V_{d,out}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรทระดับ D คือ อัตราส่วนคาบเวลา $I_{d,in}$, $I_{d,out}$ คือ กระแสด้านเข้าและด้านออกของวงจรทระดับตามลำดับ อัตราส่วนคาบเวลาที่ต้องการสำหรับเงื่อนไขการทำงานกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (16)

$$D = I - \left(\frac{V_{d,in}}{V_{d,out}} \right) \quad (16)$$

แรงดันด้านออกของวงจรทระดับในเทอมของแรงดันด้านเข้าและอัตราส่วนคาบเวลาแสดงได้ในสมการที่ (17)

$$V_{d,out} = \frac{V_{d,in}}{(I-D)} \quad (17)$$

แรงดันด้านออก ในโหลดกระแสต่อเนื่องสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V_{d,out} = \frac{I_{d,out}D}{Cf_{sb}} \quad (18)$$

เมื่อ C คือ ตัวเก็บประจุของวงจรทระดับ f_{sb} คือ ความถี่การสวิทช์ของวงจรทระดับ

3.4. วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ [4]

วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5 จะคล้ายกับกรณียังกรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะไม่ใช้ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติ เพื่อให้่ายต่อการวิเคราะห์ สวิตช์ S_{w1} จะนำกระแสในขณะ S_{w1} จะไม่นำกระแส

3.4.1 กรณีสวิตช์ S_{w1} นำกระแสและสวิตช์ S_{w2}

ไม่นำกระแส

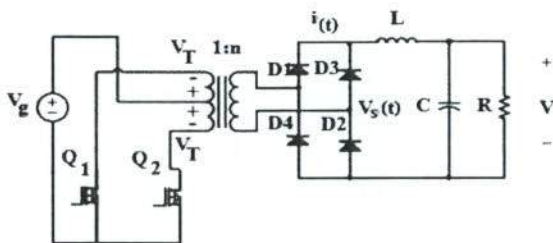
เมื่อสวิตช์ S_{w1} นำกระแสจะเป็นผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) เท่ากับ

$$V_{p1} = V_s \tag{19}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ขด ที่เหลือ ดังนี้

$$V_{sw2} = 2V_s \tag{20}$$

ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสตรงขณะที่ไดโอด D_2 ได้รับไบอัสกลับ



รูปที่ 5 วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

ถ้าสมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านออก V_o และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าคงที่ ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสจะเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L_x} \tag{21}$$

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันก็จะสามารถหาได้คล้ายกับกรณียังกรบักเช่นกัน จะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - 2D}{32L_x C f^2} \tag{22}$$

3.5. วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ถูกค้นพบครั้งแรกตั้งแต่ปี 1964 [7] การควบคุมแบบนี้จะประมวลผลภายใต้เงื่อนไขความถี่การขับนำสวิตช์ (f_s) และอัตราส่วนความถี่ของสัญญาณคำสั่ง และอัตราส่วนแรงดันด้านเข้าและด้านออก บางครั้งเรียกว่าดัชนีการมอดูเลชัน (m_a) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{\hat{V}_{LLC}}{V_{d,out}} \tag{23}$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุม \hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f แสดงได้ดังนี้

$$m_f = \frac{f_s}{f_i} \tag{24}$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ f_i คือความถี่หลักมูลการควบคุมแรงดันด้านออกจะพยายามลดส่วนของแรงดันผิดเพี้ยนจากแรงดันคำสั่ง ค่าความผิดเพี้ยนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า m_a อยู่ในย่าน over-modulation ($m_a > 1$) ในย่านเชิงเส้น ($m_a < 1$) ส่วนประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตาม m_a ดังแสดงในสมการที่ (25) แรงดันด้านออกที่ความถี่หลักมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{LLC} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}(m_a V_{d,out}) \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ (23) ลงในสมการที่ (25) จะได้

$$V_{LLC} = m_a \left[\frac{\sqrt{3}V_{d,in}}{2\sqrt{2}(1-D)} \right] \quad (26)$$

4. การออกแบบ

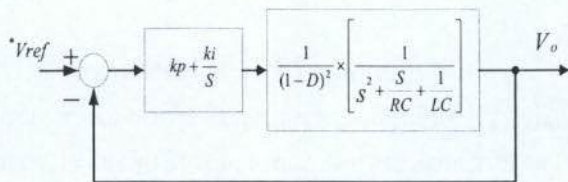
4.1. การออกแบบวงจรทระดับ

การออกแบบวงจรทระดับสำหรับระบบกักหน้ลมผลิตไฟฟ้าขนาด กำลังไฟฟ้า 1 kW พิกัดแรงดัน 48 V โดยงานวิจัยนี้กำหนดแรงดันด้าเข้า 64V แรงดันด้าออก 100 V ที่ค่าระลอกแรงดัน 10 % ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทระดับได้จากสมการที่ (23) และ (24) ตามลำดับ [5]

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (27)$$

$$C = \frac{D}{Rf_s} \frac{\Delta V}{V} \quad (28)$$

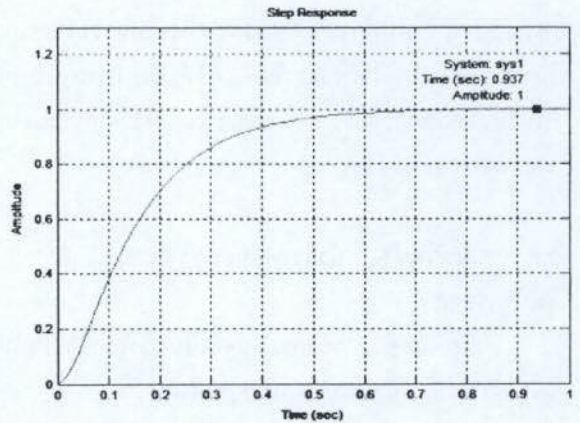
แทนค่าลงในสมการที่ (27) และ(28) จะได้ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบคือ $L = 60 \mu F$, $C = 50 \mu F$, $D = 0.36$ โดยระบบจะควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันของวงจรทระดับ[6]

ในการหาค่า k_p k_i โดยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีโอ ด้วย Ziegler-Nichols โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากกราฟผลตอบสองในโปรแกรม MATLAB/

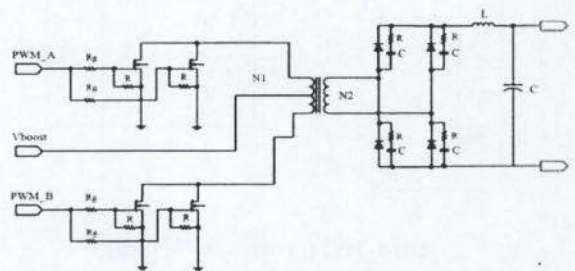
Simulink [7] จะได้ $k_p = 4.05$ และ $k_i = 0.4$ และจะ Step Response ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟ Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols

4.2. การออกแบบวงจรพุก-พุดคอนเวอร์เตอร์

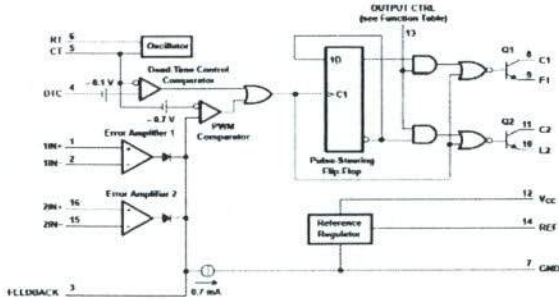
ในการออกแบบวงจรพุก-พุด คอนเวอร์เตอร์นี้ จะใช้ IC TL494 เป็นตัวสร้างสัญญาณ Pulse width modulation (PWM) เพื่อไปควบคุมการขับของสวิตช์ MOSFET ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เบอร์ IRFP 460 มีคุณสมบัติในการทนแรงดันได้ 500V และทนกระแสได้ 20A



รูปที่ 8 โครงสร้าง ของวงจรพุก-พุดคอนเวอร์เตอร์

วงจรควบคุมเลือกใช้ไอซี TL494 เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถใช้ในการควบคุมวงจรพุก-พุด คอนเวอร์เตอร์และสามารถควบคุม PWM ของวงจรควบคุมโดยภายในตัวไอซีจะมีแรงดันอ้างอิง วงจรเปรียบเทียบ

2 วงจร วงจรผลิตความถี่ PWM, flip flop และมีสัญญาณเอาต์พุตสองสัญญาณเพื่อไปขับสวิตช์ MOSFET



รูปที่ 9 วงจรภายในอุปกรณ์ไอซี TL 494

$$f_{out} = \frac{1.1}{2R_T C_T} \quad (29)$$

ซึ่งจะได้ค่า R ที่ใช้ควบคุมความถี่ เท่ากับ 55 KΩ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับวงจรพหุ-ฟลูคอนเวอร์เตอร์

แรงดันด้านเข้า	(V _{in})	100 V
กระแสด้านออก	(I _o)	2 A
ความถี่สวิตซ์	(f _s)	10 kHz
แรงดันด้านออก	(V _o)	537 V ± 10%

$$A_p = A_c A_w \frac{\sqrt{2} \cdot P_{o2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{4J K_w B_w f_s} \quad (30)$$

จากสมการที่ (30) จะทำการเลือกขนาดแกนเหล็ก

$$A_p = 83526.9 \text{ mm}^4$$

ดังนั้นทำการเลือกแกนแม่เหล็กเบอร์ E65 / 32 / 13

$$N_1 = \frac{V_{in,max}}{4A_c B_m f_s} \quad (31)$$

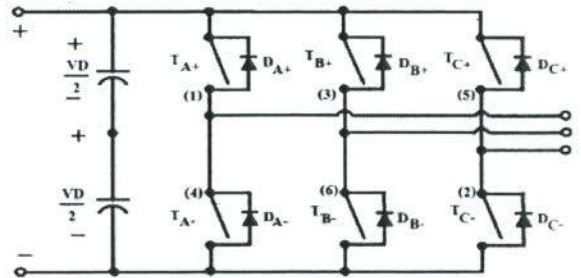
จากสมการที่ (31) สามารถหาจำนวนรอบด้านปฐมภูมิได้เท่ากับ 50 รอบ

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_o'}{V_{in,min} (2D_{max})} \quad (32)$$

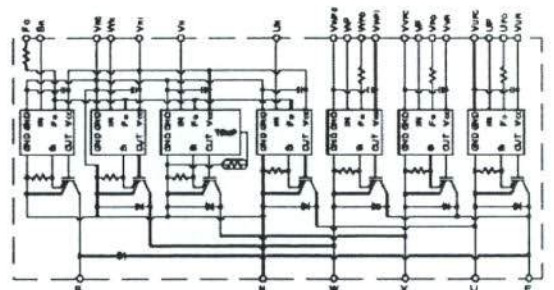
จากสมการที่ เลือกค่า D_{max} = 0.45 จะได้จำนวนรอบด้านทุติยภูมิเท่ากับ 273 รอบ

4.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

ในงานวิจัยนี้ใช้ IGBT เบอร์ PM50RS120 ซึ่งมีอัตราการทำงานแรงดันได้ 1200 V และอัตราการทำงานกระแสได้ 50A ซึ่งจะรับสัญญาณขับจาก DSP ทั้ง 6 สัญญาณ และมีการแยกกราวด์ของชุดวงจรควบคุมออกจากภาคกำลัง ด้วยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อให้ความปลอดภัยในการใช้งานโดยใช้ IC HCPL 4506



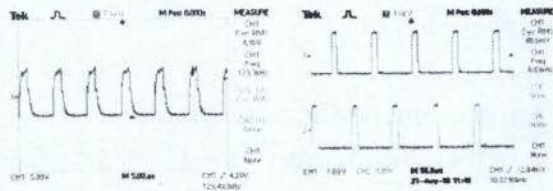
รูปที่ 10 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



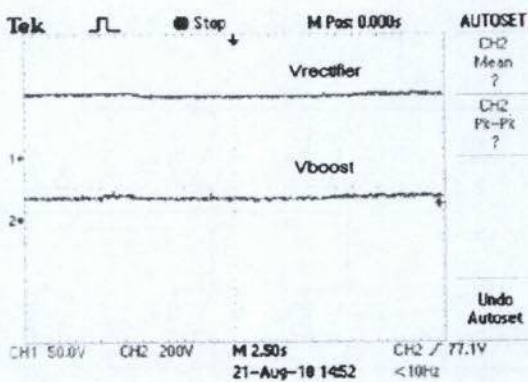
รูปที่ 11 วงจรภายในของอุปกรณ์ PM50RS120

5. ผลการทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์

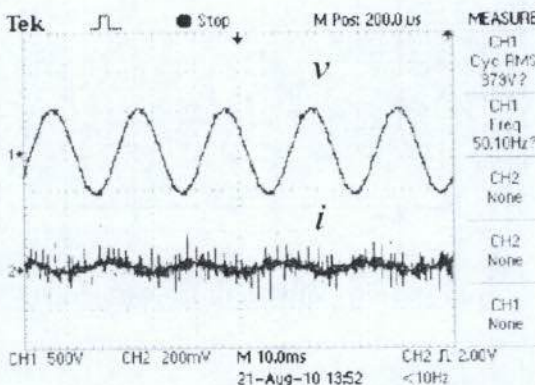
กรณีที่ 1 การทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจากรหัสกันลมนผลิตไฟฟ้าที่สภาวะความเร็วลมคงที่



รูปที่ 12 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ของวงจรระดับและวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์



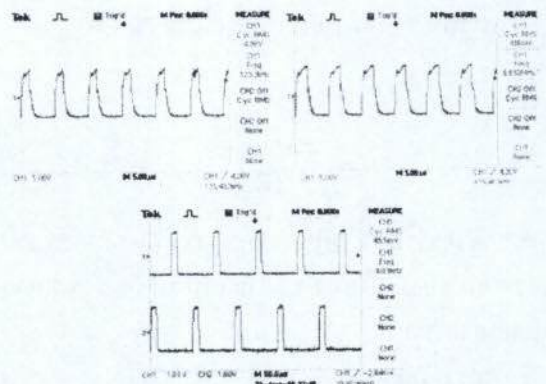
รูปที่ 13 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรทระดับ



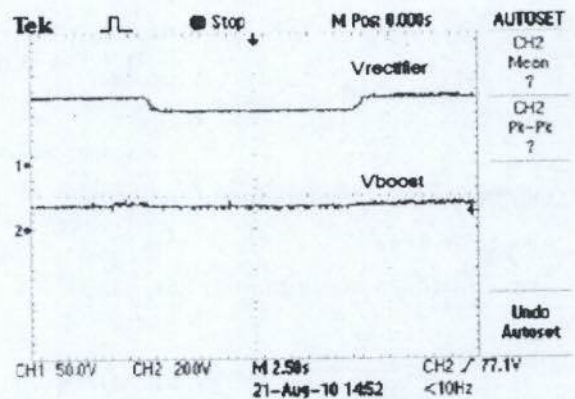
รูปที่ 14 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

จากรูปที่ 12 จะเป็นสัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ มอสเฟดของวงจรทระดับ และวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ รูปที่ 13 เป็นแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และวงจรทระดับที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจากรหัสกันลมนผลิตไฟฟ้าสภาวะความเร็วลมคงที่ รูปที่ 14 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

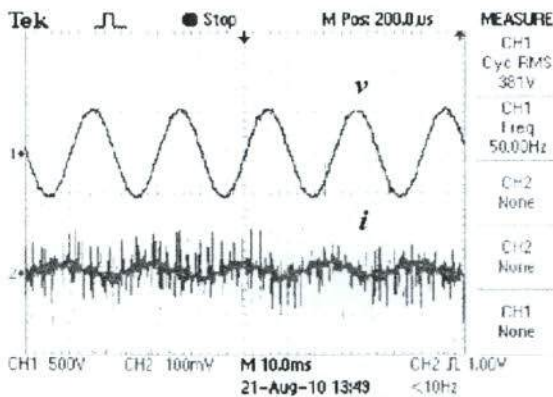
กรณีที่ 2 การทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจากรหัสกันลมนผลิตไฟฟ้าที่สภาวะความเร็วลมเกิดการเปลี่ยนแปลง



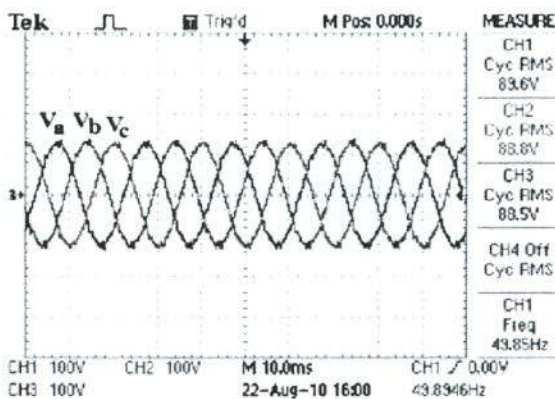
รูปที่ 15 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ของวงจรทระดับและวงจรพุ่ม - พูลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 16 แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรทระดับ



รูปที่ 17 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูปที่ 18 แรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส

จากรูปที่ 15 จะเป็นสัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์มอสเฟตของวงจรทระดับ ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากกัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง และ สัญญาณขับสวิตช์มอสเฟตของวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์รูปที่16 แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟส และแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรทระดับ จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากกัณฑ์ลผลิตไฟฟ้า แต่แรงดันด้านออกของวงจรทระดับยังคงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ได้ รูปที่ 17 แรงดันและกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส รูปที่ 18 แรงดันไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส

6. สรุป

บทความนี้ทำการออกแบบ และสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยทำการยกระดับแรงดันด้วยวงจรทระดับแรงดันโดยมีการตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทระดับเพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เพื่อไปควบคุมสวิตช์ของวงจรทระดับแรงดันให้คงที่ และใช้วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ ทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสให้ได้แรงดันที่ออกแบบไว้คือ 380 V ที่ความถี่ 50 Hz

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Johnson, G. L. Wind Energy Systems. England Cliffs: Prentic-Hall, 2001.
- [2] Fateev, E. M. Wind Motors and Wind Power Stations. Moscow, 1948.
- [3] Mohan, N.; Undeland, T. and Robbins, W. Power Electronics, Converters, Application and Design. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] สุวัฒน์ คั่น, "เทคนิคการและออกแบบสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย" พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท เอนเทค ไทยจำกัด, กรุงเทพฯ, 2537.
- [5] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 2, วิ.เจ. พรินติ้ง, 2547
- [6] http://services.eng.uts.edu.au/~venkat/pe_html/Ch07s3p1.htm
- [7] MATLAB User Manual, refer to this website: www.mathwork.com.